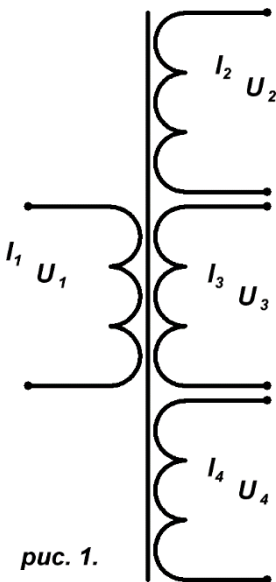


Маломощные силовые трансформаторы при их массовом производстве проектируют и изготавливают на стандартных сердечниках, составляющих унифицированные ряды. Для питания аппаратуры от сети 50 *Гц* широко применяются трансформаторы броневого и стержневого типов. По технико – экономическим показателям предпочтительны трансформаторы стержневого типа, выполненные на стандартных магнитопроводах оптимальной формы. Броневая конструкция практически равноценна стержневой по массе, но уступает по объему и стоимости. Несмотря на эти недостатки для малых мощностей (до 100...200 *ВА*) при напряжениях менее 1000 *В*, отдают предпочтение броневым трансформаторам, как более простым по конструкции. При мощности в несколько сотен вольт – ампер наиболее перспективными являются стержневые трансформаторы с двумя катушками на ленточных магнитопроводах оптимальной формы.



Заданными величинами при расчете трансформатора (рис. 1) являются напряжение питающей сети (*В*); напряжения вторичных обмоток $U_2, U_3 \dots$ (*В*); токи вторичных обмоток $I_2, I_3 \dots$ (*А*); частота тока сети питания *Гц*).

Расчет трансформатора проводится в следующем порядке:

Определяем ток первичной обмотки трансформатора:

$$I = I_{1,2,3} + I_{1,2,3} + \dots I_n$$

Составляющие вызванные токами вторичных обмоток при резистивной нагрузке равны:

$$I_{1(n)} = \frac{I_n \times U_n}{U_1}$$

где $n \geq 1$ порядковый номер обмотки.

2. Определяем габаритную мощность трансформатора

$$S_{\Gamma} = \frac{U_1 \times I_1 + U_2 \times I_2 + U_3 \times I_3 + \dots + U_n \times I_n}{2 \times \eta}$$

Здесь η – *кпд*, значение которого для маломощных трансформаторов находится в пределах 0,75 – 0,95.

3. По габаритной мощности трансформатора выбираем магнитопровод на данную мощность. Стандартный магнитопровод можно выбрать также по произведению $S_{\text{СТ}} \times S_{\text{ОК}}$, *см*⁴, где $S_{\text{СТ}}$ и $S_{\text{ОК}}$ – площадь поперечного сечения стержня магнитопровода и площадь окна ($S_{\text{СТ}} = b \times a$; $S_{\text{ОК}} = c \times h$):

$$S_{\text{СТ}} \times S_{\text{ОК}} = \frac{S_{\Gamma} \times 10^2}{2,22 \times f \times B \times j \times k_M \times k_C \times \eta}$$

Для броневого и стержневого трансформаторов, выполненных на пластинчатых магнитопроводах из горячекатаной стали, индукцию в стержне сердечника можно принять в пределах $B = 1,2 \dots 1,3$ *Тл*. В трансформаторах, выполненных на ленточных сердечниках из холоднокатаной стали $B = 1,5 \dots 1,65$ *Тл*. (индукции для 50 *Гц*, тесла).

Плотность тока j в проводах обмоток трансформатора может составлять 3,5 – 4,5 А/мм² для трансформаторов мощностью до 100 ВА и 2,5 – 3,5 А/мм² для трансформаторов мощностью от 100 до 500 ВА. Значения коэффициентов заполнения медью окна сердечника k_m при $f_c = 50$ гц:

S_r, BA	k_m
15 – 50	0,22 – 0,28
50 – 150	0,28 – 0,34
150 – 300	0,34 – 0,36
300 – 1000	0,36 – 0,38

Значения коэффициентов заполнения сталью площади поперечного сечения стержня магнитопровода:

Толщина листа (ленты)	k_c для пластинчатых магнитопроводов	k_c для ленточных магнитопроводов
0,2 – 0,35	0,82 – 0,89	0,93 – 0,95
0,35 – 0,5	0,89 – 0,93	0,95 – 0,97

$K_{нд}$ определяем из рис. 2. Определив $S_{СТ}$ и $S_{ОК}$ выбираем стандартный магнитопровод, у которого данное произведение больше или равно расчетному. Выбрав из таблиц магнитопровод, находим его основные размеры.

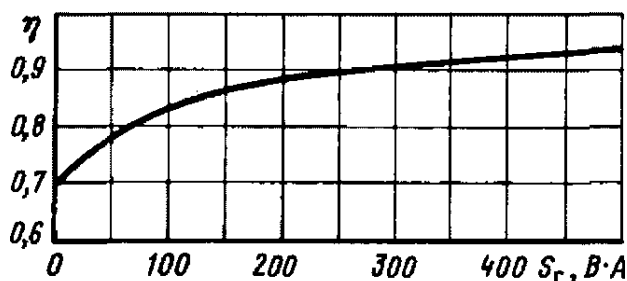


рис. 2.

4. Определяем число витков обмоток трансформатора.

$$W_1 = \frac{U_1 \times \left(1 - \frac{\Delta U_1}{100}\right) \times 10^4}{4,44 \times f \times B \times S_{СТ}}$$

$$W_{2,3n} = \frac{U_2 \times \left(1 + \frac{\Delta U_2}{100}\right) \times 10^4}{4,44 \times f \times B \times S_{СТ}}$$

Падение напряжения находим на рис. 3.

5. Определяем диаметр проводов обмоток трансформатора (без учета толщины изоляции)

$$D_{1,2,3 \dots n} = 1,13 \times \sqrt{\frac{I_{1,2,3 \dots n}}{j}}$$

Выбираем марку провода и определяем диаметры проводов обмоток трансформатора с учетом толщины изоляции $d_{1из}$, $d_{2из}$... $d_{3из}$. Обмотки маломощных низковольтных трансформаторов выполняются в основном из проводов с эмалевой изоляцией.

6. Определяем толщину обмоток трансформатора и проверяем, уместятся ли они в окне выбранного сердечника.

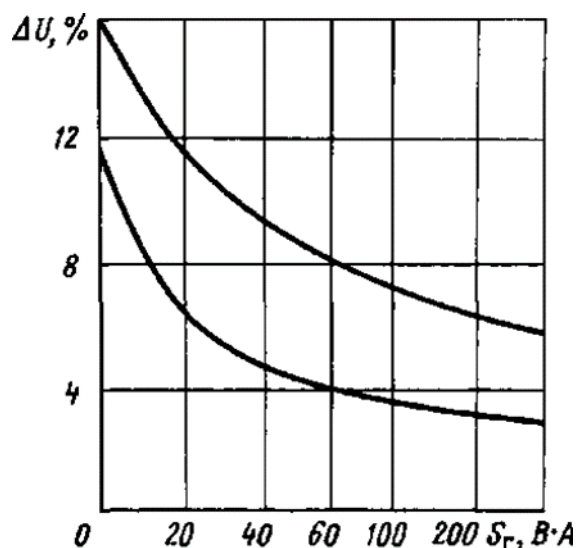
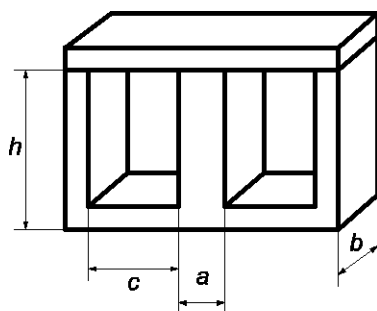


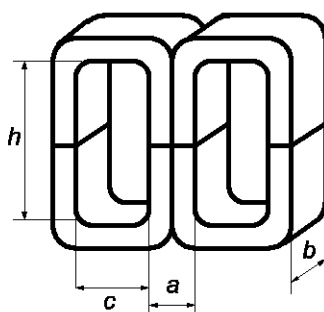
Рис. 3

Вариант II. Расчет сетевого трансформатора.
источник: неизвестен.

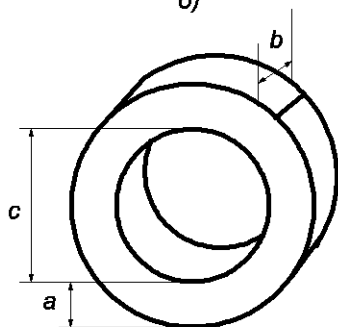
Конструкция магнитопроводов трансформаторов: а) броневое пластинчатое, б) броневое ленточное, в) кольцевого ленточного. Для малых мощностей, от единиц до



а)



б)



в)

десятков ватт, наиболее удобны броневые трансформаторы. Они имеют один каркас с обмотками и просты в изготовлении. Трансформатор с кольцевым сердечником (тороидальный) может использоваться при мощностях от 30 до 1000 *ватт*, когда требуется минимальное рассеяние магнитного потока или когда требование минимального объема является первостепенным. Имея некоторые преимущества в объеме и массе перед другими типами конструкций трансформаторов, тороидальные являются вместе с тем и наименее технологичными в изготовлении. Исходными начальными данными для упрощенного расчета являются:

- напряжение первичной обмотки U_1
- напряжение вторичной обмотки U_2
- ток вторичной обмотки I_2
- мощность вторичной обмотки $P_2 = I_2 \times U_2 = P_{\text{вых}}$

Если обмоток много, то мощность, отдаваемая трансформатором, определяется суммой всех мощностей вторичных обмоток.

Расчет трансформатора.

Размеры магнитопровода выбранной конструкции, необходимые для получения от трансформатора заданной мощности, могут быть найдены на основании выражения:

$$S_{\text{ок}} \times S_{\text{ст}} = \frac{0,901 \times P_{\text{вых}}}{B_{\text{макс}} \times j \times K_{\text{ок}} \times K_{\text{ст}}}$$

Где: $S_{\text{ст}}$ – сечение стали магнитопровода в месте расположения катушки. $S_{\text{ок}}$ – площадь окна в магнитопровode. $B_{\text{макс}}$ – магнитная индукция, см. таблицу 1. j – плотность тока, см. таблицу 2.

$K_{\text{ок}}$ – коэффициент заполнения окна, см. таблицу 3.

$K_{\text{ст}}$ – коэффициент заполнения магнитопровода сталью, см. таблицу 4. Величины электромагнитных нагрузок $B_{\text{макс}}$ и j зависят от мощности снимаемой со вторичной обмотки цепи трансформатора, и берутся для расчета из таблиц 1 и 2.

Таблица 1.

Конструкция магнитопровода	Магнитная индукция $B_{\text{макс}}$ (Тл) при $P_{\text{вых}}$ (Вт)				
	5 – 15	15 – 50	50 – 150	150 – 300	300 – 1000
Броневая пластинчатая	1,1 – 1,3	1,3	1,3 – 1,35	1,35	1,2 – 1,35
Броневая ленточная	1,55	1,65	1,65	1,65	1,65
Кольцевая	1,7	1,7	1,7	1,65	1,6

Таблица 2.

Конструкция магнитопровода	Плотность тока j (А/мм ²) при $P_{\text{ВЫХ}}$ (Вт)				
	5 – 15	15 – 50	50 – 150	150 – 300	300 – 1000
Бронева пластиначатая	3,0 – 3,9	2,4 – 3,0	2,0 – 2,4	1,7 – 2,0	1,4 – 1,7
Бронева ленточная	3,5 – 3,8	2,7 – 3,5	2,4 – 2,7	2,3 – 2,4	1,8 – 2,3
Кольцевая	4,5 – 5		3,5 – 4,5	3,5	3,0

Коэффициент заполнения окна $K_{\text{ОК}}$ приведен в таблице 3 для обмоток, выполненных проводом круглого сечения с эмалевой изоляцией. Коэффициент заполнения сечения магнитопровода сталью $K_{\text{СТ}}$ зависит от толщины стали, конструкции магнитопровода (пластинчатая, ленточная) и способа изоляции пластин или лент друг от друга. Величина коэффициента $K_{\text{СТ}}$ для наиболее часто используемой толщины пластин может быть найдена из таблицы 4.

Таблица 3.

Конструкция магнитопровода	Рабочее напряжение (В)	Коэффициент заполнения окна $K_{\text{ОК}}$ при $P_{\text{ВЫХ}}$ (Вт)				
		5 – 15	15 – 50	50 – 150	150 – 300	300 – 1000
Бронева пластиначатая	до 100	0,22 – 0,29	0,29 – 0,3	0,3 – 0,32	0,32 – 0,34	0,34 – 0,38
	100 – 1000	0,19 – 0,25	0,25 – 0,26	0,26 – 0,27	0,27 – 0,3	0,3 – 0,33
Бронева ленточная	до 100	0,15 – 0,27	0,27 – 0,29	0,29 – 0,32	0,32 – 0,34	0,34 – 0,38
	100 – 1000	0,13 – 0,23	0,23 – 0,26	0,26 – 0,27	0,27 – 0,3	0,3 – 0,33
Кольцевая		0,18 – 0,2		0,2 – 0,26	0,26 – 0,27	0,27 – 0,28

Таблица 4

Конструкция магнитопровода	Коэффициент заполнения $K_{\text{СТ}}$ при толщине стали, мм.				
	0,08	0,1	0,15	0,2	0,35
Бронева пластиначатая	–	0,7 (0,75)	–	0,85 (0,89)	0,9 (0,95)
Бронева ленточная	0,87	–	0,9	0,91	0,93
Кольцевая	0,85		0,88		

Примечание: Коэффициенты заполнения для пластиначатых сердечников указаны в скобках при изоляции пластин лаком или фосфатной пленкой. Коэффициенты заполнения для ленточных магнитопроводов указаны при изготовлении их методом штамповки и гибки ленты. Определив величину $S_{\text{ОК}} \times S_{\text{СТ}}$, можно выбрать необходимый линейный размер магнитопровода, имеющий соотношение площадей не менее чем получено в результате расчета. Величину номинального тока первичной обмотки находим по формуле:

$$I_1 = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{U_1 \times \eta \times \cos\varphi}$$

величина η и $\cos\varphi$ трансформатора, входящие в выражение, зависят от мощности и могут быть ориентировочно определены по таблице 5.

Таблица 5.

Величина	Суммарная мощность вторичных обмоток $P_{\text{ВЫХ}}$ (Вт)				
	2 – 15	15 – 50	50 – 150	150 – 300	300 – 1000
η броневой	0,5 – 0,6	0,6 – 0,8	0,8 – 0,9	0,9 – 0,93	0,93 – 0,95
η ленточный	0,76 – 0,88		0,88 – 0,92	0,92 – 0,95	0,95 – 0,96
$\cos\varphi$	0,85 – 0,9	0,9 – 0,93	0,93 – 0,95	0,93 – 0,94	0,93 – 0,94

Ток вторичных обмоток обычно заданы. Теперь можно определить диаметр проводов в каждой обмотке без учета толщины изоляции. Сечение провода в обмотке (j – плотность тока):

$$S_{\text{пр}} = \frac{I}{j}$$

диаметр провода:

$$d = 1,13\sqrt{S_{\text{пр}}}$$

Определяем число витков в обмотках трансформатора:

$$W_n = \frac{45 \times U_n \times \left(1 - \frac{\Delta U_n}{100}\right)}{B_{\text{МАХ}} \times S_{\text{СТ}}}$$

где: n – номер обмотки, ΔU_n – падение напряжения в обмотках, выраженное в процентах от номинального значения, см. таблицу 6 и 7. Следует отметить, что данные для ΔU_n , приведенные в таблице 6, для многообмоточных трансформаторов требуют уточнения. Рекомендуется принимать значения ΔU_n для обмоток, расположенных непосредственно на первичной обмотке на 10 – 20% меньше, а для наружных обмоток на 10 – 20% больше указанных в таблице. В тороидальных трансформаторах относительная величина полного падения напряжения в обмотках значительно меньше по сравнению с броневыми трансформаторами. Это следует учитывать при определении числа витков обмоток – значения ΔU_n берутся из таблицы 7.

Таблица 6.

Конструкция броневая величина ΔU_n (%)	Суммарная мощность вторичных обмоток $P_{\text{ВЫХ}}, \text{Вт}$				
	2 – 15	15 – 50	50 – 150	150 – 300	300 – 1000
ΔU_{n1}	20 – 13	13 – 6	6 – 4,5	4,5 – 3	3 – 1
ΔU_{n2}	25 – 18	18 – 10	10 – 8	8 – 6	6 – 2

Таблица 7.

Конструкция кольцевая величина ΔU_n (%)	Суммарная мощность вторичных обмоток $P_{\text{ВЫХ}}, \text{Вт}$				
	8 – 25	25 – 60	60 – 125	125 – 250	250 – 600
ΔU_{n1}	7	6	5	3,5	2,5
ΔU_{n2}	7	6	5	3,5	2,5

Пример расчета сетевого тороидального трансформатора.

Исходные данные: входное напряжение $U_1 = 220$, выходное напряжение $U_2 = 22$, максимальный ток нагрузки $I_2 = 10$ А. Мощность вторичной цепи определяем из формулы: $P_2 = U_2 \times I_2 = 220 \text{ Вт}$.

Имеется кольцевой ленточный магнитопровод с размерами: $b = 4 \text{ см.}$, $c = 7,5 \text{ см.}$, $a = 2 \text{ см.}$ (см. рис.):

$$S_{\text{ОК}} = \pi \times R_2 = 3,14 \times 3,752 = 44,1 \text{ см}^2$$

$$S_{\text{СТ}} = a \times b = 2 \times 4 = 8 \text{ см}^2$$

Воспользовавшись формулой мощности и таблицами, определяем, какую максимальную мощность можно снять с данного магнитопровода:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{B_{\text{МАХ}} \times j \times K_{\text{ОК}} \times S_{\text{СТ}} \times S_{\text{ОК}}}{0,901} = \frac{1,65 \times 3,5 \times 0,27 \times 0,88 \times 8 \times 44,1}{0,901} = 537,28 \text{ Вт}$$

Расчетная величина превышает необходимую по исходным данным ($P_2 = 220 \text{ Вт}$), что позволяет применить данный магнитопровод для намотки нужного трансформатора, но если требуются минимальные габариты трансформатора, то железо магнитопровода можно взять меньших размеров (или снять часть ленты) в соответствии с расчетом. Номинальный ток первичной обмотки:

$$I_1 = \frac{220}{220 \times 0,95 \times 0,93} = 1,13 \text{ А}$$

Сечение провода в обмотках:

$$S_1 = \frac{1,13}{3,5} = 0,32 \text{ мм}^2 \quad S_2 = \frac{10}{3,5} = 2,86 \text{ мм}^2$$

диаметр провода:

$$d_1 = 1,13 \times \sqrt{0,32} = 0,64 \text{ мм.}, \quad d_2 = 1,13 \times \sqrt{2,86} = 1,9 \text{ мм.}$$

Выбираем ближайшие диаметры провода из ряда стандартных размеров, выпускаемых промышленностью – 0,63 и 2 мм. Число витков в обмотках трансформатора:

$$W_1 = \frac{45 \times 220 \times \left(1 - \frac{2,5}{100}\right)}{1,65 \times 8} = 731 \quad W_2 = \frac{45 \times 22 \times \left(1 - \frac{2,5}{100}\right)}{1,65 \times 8} = 73$$

Вариант III. Конструктивный расчет силового трансформатора.

источник: С. Н. Кризе "Расчет трансформаторов и дросселей фильтров", 1950 г.

Ниже приводится упрощенный метод конструктивного расчета маломощных однофазных силовых трансформаторов, пригодный для мощностей до нескольких сотен ватт. Этот метод, несмотря на свою простоту, дает точность вполне удовлетворительную для практических целей.

При расчете трансформатора всегда заданы:

- 1) напряжение U_1 питающей сети, подаваемое на первичную обмотку;
- 2) эффективные напряжения вторичных обмоток $U_2, U_3, \dots U_n$
- 3) эффективные токи вторичных обмоток $I_2, I_3, \dots I_n$

Кроме того, иногда бывает известен наиболее желательный тип сердечника.

В результате расчета трансформатора должны быть найдены:

- 1) тип сердечника (если он не задан) и его габариты;
- 2) количество витков каждой из обмоток $w_1, w_2, \dots w_n$
- 3) диаметр провода каждой обмотки $d_1, d_2, \dots d_n$

Расчет следует начинать с определения типа и размеров сердечника трансформатора.

Если тип сердечника трансформатора задан, то приводимые ниже формулы могут быть использованы для его поверочного расчета.

Определение типа и размеров сердечника.

Перед тем, как приступить к конструктивному расчету трансформатора, нужно определить суммарную мощность всех его вторичных обмоток P_n по формуле:

$$P_n = P_1 + P_2 + P_3 + \dots P_n$$

и по величине P_n выбрать согласно таблице 1:

Таблица 1

Мощность трансформатора, <i>ва</i>	<i>B, гс</i>	η_T	$\Delta, \text{а/мм}^2$
до 10	5000 – 6000	0,6 – 0,7	2,5 – 3
10 – 30	7000	0,7 – 0,8	2,5
30 – 50	8000	0,8 – 0,85	2 – 2,5
50 – 100	10000	0,85 – 0,9	2 – 2,5
Свыше 100	11000	0,9	2

1) индукцию в сердечнике трансформатора, *гс*

2) коэффициент полезного действия трансформатора, η_T

3) плотность тока в обмотке трансформатора, Δ

Кроме того, по табл. 2 нужно определить k_M – коэффициент заполнения окна сердечника медью, т. е. отношение суммарного сечения меди всех витков первичной и вторичных обмоток трансформатора к площади окна сердечника.

Располагая всеми этими данными, мы можем вычислить основной параметр, характеризующий сердечник трансформатора данной мощности, а именно произведение сечения сердечника $Q_{\text{ж}}$ на площадь окна Q_0 :

$$Q_0 \times Q_{\text{ж}} = \frac{10000}{B} \times \frac{P_{\text{н}} \times (1 + \eta_T)}{2 \times \eta_T \times k_M \times \Delta}$$

Труднее всего правильно выбрать коэффициент заполнения окна сердечника медью k_M . Если величина k_M выбрана слишком малой, сердечник будет недоиспользован, если величина k_M взята слишком большой, обмотки трансформатора могут не поместиться в окне. Коэффициент заполнения k_M зависит от диаметра и вида изоляции провода, а также от рабочего напряжения трансформатора. С уменьшением диаметра провода и повышением рабочего напряжения процент площади, занимаемой изоляцией и прокладками, увеличивается, а коэффициент заполнения уменьшается. Величину k_M для встречающихся в радиолюбительской практике трансформаторов с максимальным напряжением до 1000 в приближенно можно определить следующим образом: вычислив по формулам, связанных соотношением приведенным в расчете токов, токи во вторичной и в первичной обмотках:

$$\text{ток вторичной обмотки: } I_2 = (1 \div 1,2) \times I_0$$

$$\text{ток первичной обмотки: } I_1 = 1,1 \times \frac{P_1}{U_1}$$

Вычислив токи первичной и вторичной обмотки (I_1, I_2) и задавшись токами, которые нам нужно получить от обмоток (I_3, I_4, I_n), а также плотностью тока Δ в обмотках, определяем диаметры их проводов. Принимая плотность тока $\Delta = 2 \text{ а/мм}^2$, необходимые диаметры проводов обмоток находим по формуле:

$$d_n = 0,8 \times \sqrt{I_n}$$

При плотности тока $\Delta = 2,5 \text{ а/мм}^2$ минимально необходимые диаметры проводов находим по формуле:

$$d_n = 0,7 \times \sqrt{I_n}$$

В последних двух формулах индексы n соответствуют номерам обмоток, сила тока выражается в амперах.

По вычисленному диаметру проводов и их маркам изоляции находим по табл. 2 коэффициенты заполнения для первичной и вторичной обмоток.

Найденные коэффициенты складываем и сумму делим на два. Полученную в результате величину k_M подставляем в формулу расчета основного параметра сердечника ($Q_{Ж} \times Q_0$).

Таблица 2.

диаметр провода	тип провода		
	ПЭ	ПЭШД, ПШД	ПБД
	коэффициент k_M		
0,1 – 0,2	0,1 – 0,2	–	–
0,2 – 0,4	0,2 – 0,3	0,1 – 0,2	–
0,4 – 0,8	0,3 – 0,35	0,2 – 0,3	0,1 – 0,2
0,8 – 1,5	0,35 – 0,45	0,3 – 0,35	0,2 – 0,3

Если в формулу ($Q_{Ж} \times Q_0$) подставить наиболее вероятные величины:

$$B = 10000 \text{ гс}, \eta_T = 0,8, \Delta = 2 \text{ а/мм}^2, k_M = 0,3$$

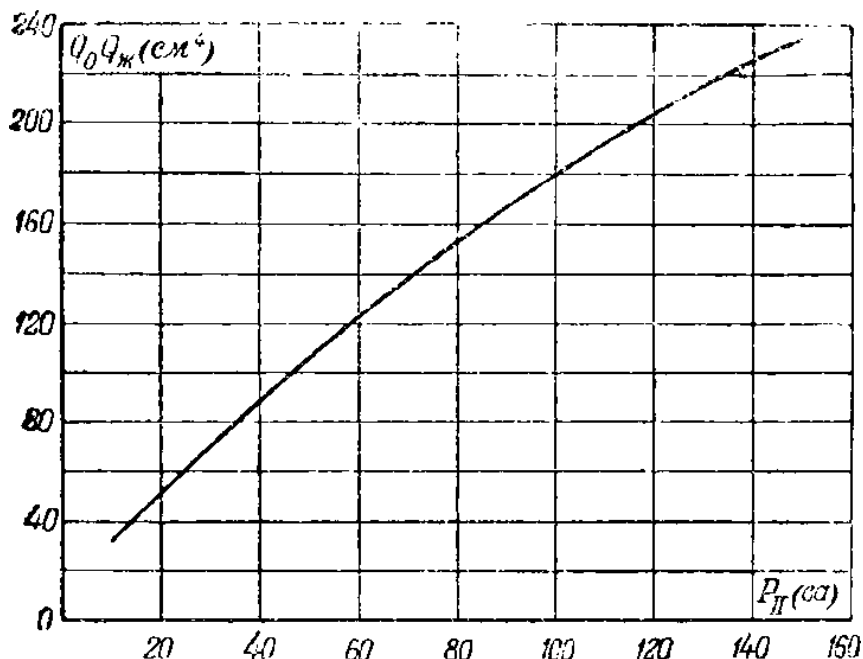
то получим:

$$Q_{Ж} \times Q_0 \approx 2 \times P_H (\text{ва})$$

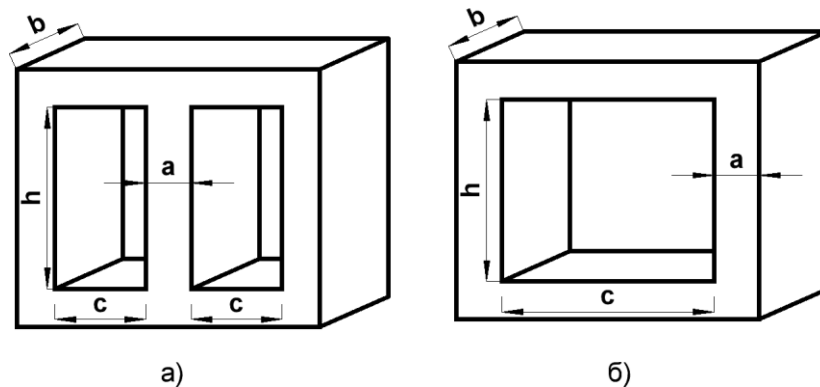
т. е. произведение площади окна на площадь железа сердечника должно быть приблизительно равно удвоенной мощности трансформатора. На фиг. 1 приведен график для ориентировочного определения размеров трансформатора по заданной мощности. Если задан тип (штамп) сердечника, то минимально необходимая толщина набора (b – фиг. 2) находится из выражения:

$$b = \frac{Q_0 \times Q_{Ж}}{a \times h \times c}$$

Размеры a, h, c показаны на фиг. 2.



Фиг. 1. График определения размеров трансформатора по заданной мощности.



Фиг. 2. а) Основные размеры сердечника броневого типа (Ш – образного) и б) стержневого типа (О – образного).

Расчет обмоток трансформатора.

Количество витков первичной обмотки w_1 находим из формулы:

$$w_1 = \frac{U_1 \times 1000000}{2 \times (B \times Q_{\text{ж}} + l_0 \times \Delta \times 100)}$$

где: U_1 – напряжение сети; B – индукция в сердечнике в гс; площадь сечения сердечника в см²; l_0 – средняя длина витка в см.; (расчет средней длины витка – см. стр. 33), Δ – плотность тока в а/мм². Второе слагаемое знаменателя представляет собой поправку на падение напряжения в омическом сопротивлении первичной обмотки. Оценим порядок величины этой поправки. Для трансформатора мощностью около 50 – 100 вт величины, входящие в знаменатель, имеют приблизительно такое значение:

$$B = 10000 \text{ гс}, Q_{\text{ж}} = 10 \text{ см}^2, l_0 = 20 \text{ см.}, \Delta = 2 \text{ а/мм}^2$$

Следовательно, $BQ_{\text{ж}} = 100000$; $l_0 \times \Delta \times 100 = 4 \times 1000$, т. е. поправка на падение напряжения в омическом сопротивлении обмотки составляет около 4%.

Приближенная формула для определения количества витков первичной обмотки трансформатора при индукции $B \approx 10000$ гс имеет вид:

$$w_1 \approx 48 \times \frac{U_1}{Q_{\text{ж}}}$$

Число витков любой из вторичных обмоток w_n вычисляется по формуле:

$$w_n = \frac{U_n \times 1000000}{2 \times (B \times Q_{\text{ж}} - l_0 \times \Delta \times 100)}$$

где U_n – напряжение данной обмотки.

Поправка на падение напряжения во вторичных обмотках получается того же порядка, что и для первичной обмотки, но она имеет обратный знак. Приближенная формула для определения количества витков любой из вторичных обмоток для $B = 10000$ гс имеет следующий вид:

$$w_1 = 52 \times \frac{U_n}{Q_{\text{ж}}}$$

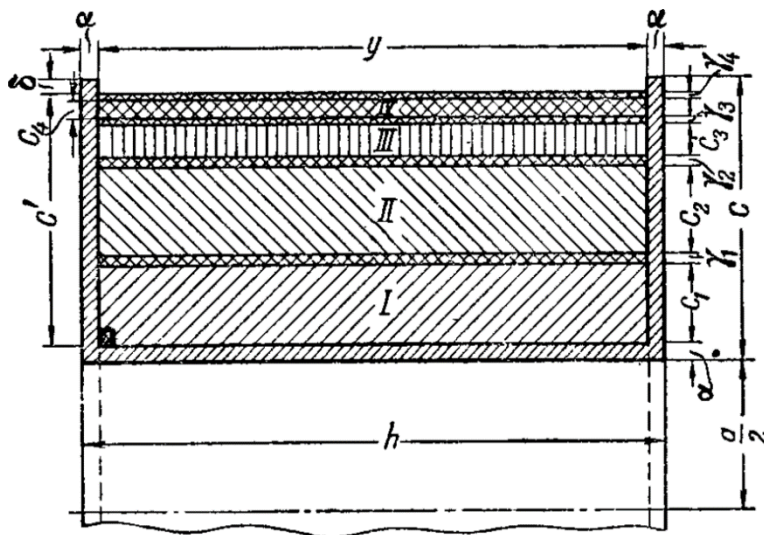
Диаметры проводов обмоток мы уже вычислили ранее.

Проверка размещения обмоток.

После того как найдены числа витков и диаметры проводов каждой из обмоток, следует проверить размещение обмоток в окне сердечника. Такая проверка особенно желательна, учитывая, что при определении размеров сердечника мы задавались приближенным значением коэффициента заполнения окна медью k_m . Рассмотрим, как производится проверка размещения обмоток для трансформатора броневых типа. Сначала находим длину u занимаемую обмотками (см. фиг. 3):

$$y = h - 2 \times a$$

где a – толщина каркаса, которая берется порядка 1,5 – 2 мм.



Фиг. 3. Катушка трансформатора броневого типа в разрезе.

Затем определяем число витков в слое для нижней (первичной) обмотки трансформатора:

$$w'_1 = \frac{y}{d'_1}$$

где d_1 – диаметр провода данной обмотки с учетом изоляции. Величина d_1 находится из справочной таблицы номиналов обмоточных проводов из известного из предыдущего расчета диаметру провода без изоляции и в соответствии с выбранным видом изоляции провода (ПЭ, ПШД и пр.). Далее находим число слоев первичной обмотки:

$$n_1 = \frac{w_1}{w_1'}$$

Величину n_1 округляем до ближайшего большего целого числа. Высоту обмотки с учетом изоляционных прокладок находим из выражения:

$$c_1 = n_1 \times (d'_1 + \beta) + \gamma$$

где β – толщина прокладок между слоями; γ – толщина прокладок между обмотками. Обычно $\beta \approx 0,05 \div 0,15$ мм., $\gamma = 1 - 2$ мм.

Подобным же образом находим высоту всех остальных обмоток:

$$c_2 = h_2 \times (d'_2 + \beta) + \gamma \quad c_n = h_n \times (d'_n + \beta) + \gamma$$

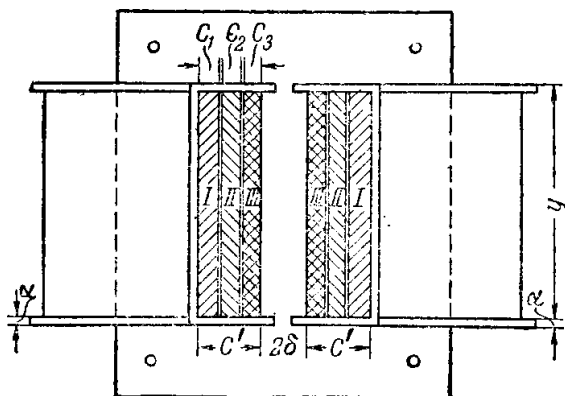
Полная высота всех обмоток трансформатора будет равна:

$$c' = c_1 + c_2 + c_3 + \dots + c_n$$

Высота незанятой обмотками части катушки:

$$\delta = c - (c' + \alpha)$$

Эта величина должна оказаться по расчету порядка 5 мм. Если $\delta < 5$ мм, то при намотке трансформатора его обмотки могут не поместиться в окне сердечника. В этом случае целесообразно пересчитать трансформатор на несколько большую толщину набора. Если $\delta > 5 \div 10$ мм., значит размеры сердечника выбраны с излишним запасом.



Фиг. 4. Стержневой трансформатор в разрезе.

В последнем случае можно пересчитать трансформатор, уменьшив толщину набора b . Для трансформаторов стержневого типа проверка размещения обмоток производится аналогичным образом, но при расчете учитывается, что на каждой катушке наматывается половина витков каждой из обмоток (фиг. 4). Расстояние между катушками 2δ для низковольтных трансформаторов должно быть порядка 10 мм.

Пример расчета силового трансформатора.

Рассчитать силовой трансформатор по следующим данным: напряжение сети $U_1 = 110$ и 127 в; напряжение повышающей обмотки $U_2 = 700$ в; эффективный ток вторичной обмотки $I_2 = 0,1$ А; трансформатор должен иметь обмотку накала ламп, дающую $U_3 = 6,3$ в при $I_3 = 1,75$ А, и обмотку накала кенотрона, дающую $U_4 = 5$ в при $I_4 = 2$ А. Определяем суммарную мощность вторичных обмоток трансформатора:

$$P_H = 0,7 \times I_2 \times U_2 + I_3 \times U_3 + I_4 \times U_4 = 0,7 \times 0,1 \times 700 + 1,75 \times 6,3 + 2 \times 5 = 69 \text{ ВА}$$

2. Определяем силу тока в первичной обмотке по формуле:

$$I_1 = 1,1 \times \frac{69}{110} = 0,69 \text{ А}$$

3. Задаваясь в соответствии с данными табл. 1 плотностью тока в обмотках трансформатора $\Delta = 2 \text{ а/мм}^2$, находим диаметры проводов каждой из обмоток. Диаметр провода первичной обмотки:

$$d_1 = 0,8 \times \sqrt{I_1} = 0,8 \times \sqrt{0,69} = 0,67 \text{ мм.}$$

Берем провод ближайшего стандартного диаметра 0,69 мм.

Диаметр провода вторичной обмотки: $d_2 = 0,8 \times \sqrt{I_2} = 0,8 \times \sqrt{0,1} = 0,25 \text{ мм.}$

Диаметр провода обмотки накала ламп $d_3 = 0,8 \times \sqrt{I_3} = 0,8 \times \sqrt{1,75} = 1 \text{ мм.}$

Диаметр провода обмотки накала кенотрона: $d_4 = 0,8 \times \sqrt{I_4} = 0,8 \times \sqrt{2} = 1,13 \text{ мм.}$

Берем провод ближайшего стандартного диаметра 1,16 мм.

По табл. 2 находим коэффициенты заполнения для вычисленных диаметров проводов, считая, что ввиду относительно малого рабочего напряжения все провода могут иметь эмалевую изоляцию (ПЭ). Для $d_1 = 0,69$ мм. принимаем $k_M \approx 0,33$; для $d_2 = 0,25$ мм., принимаем $k_M \approx 0,25$; для $d_3 = 1$ мм., и $d_4 = 1,16$ мм. принимаем $k_M \approx 0,4$. Следовательно, средний коэффициент заполнения по меди ориентировочно будет равен:

$$k_M = \frac{0,33 + 0,25 + 0,4 + 0,4}{4} \approx 0,34$$

Принимаем с округлением $k_M = 0,3$.

4. Для выбора типа и размера сердечника находим по табл. 1 необходимые величины: $B = 10^4$ гс, $\eta = 0,87$, $\Delta = 2$ а/мм². Подставляя эти числа, а также вычисленные ранее величины $P_H = 69$ ВА и $k_M = 0,3$ в формулу, находим:

$$Q_0 \times Q_{\text{ж}} = \frac{10000}{B} \times \frac{P_H \times (1 + \eta_T)}{2 \times \eta_T \times k_M \times \Delta} = \frac{10000}{10000} \times \frac{69 \times (1 + 0,87)}{2 \times 0,87 \times 0,3 \times 2} = 124 \text{ см}^4$$

5. Для сборки сердечника наиболее подходящими будут пластины типа Ш25. Найдем минимальную толщину набора сердечника с такими пластинами:

$$b = \frac{Q_0 \times Q_{\text{ж}}}{a \times h \times c} = \frac{124}{2,5 \times 2,5 \times 6} = 3,3 \text{ см.}$$

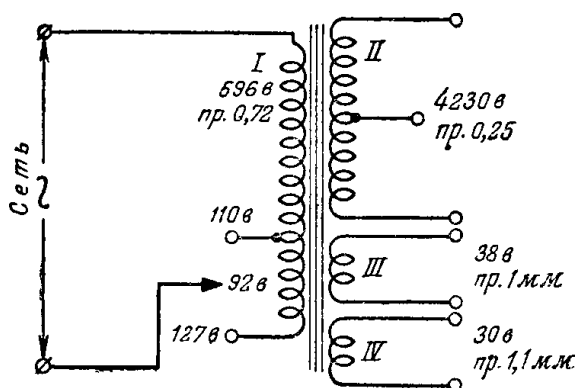
Округляем эту величину до 3,5 см. Тогда:

$$Q_{\text{ж}} = 2,5 \times 3,5 = 8,75 \text{ см}^2$$

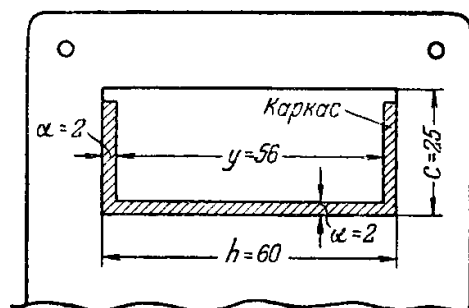
$$Q_{\text{ж}} \times Q_0 = a \times b \times h \times c = 2,5 \times 3,5 \times 2,5 \times 6 = 131 \text{ см}^4$$

6. Число витков первичной обмотки на 127 в:

$$w_1 = \frac{U_1 \times 1000000}{2 \times (B \times Q_{\text{ж}} + l_0 \times \Delta \times 100)} = \frac{127 \times 1000000}{2 \times (10000 \times 8,75 + 24 \times 2 \times 100)} = 688$$



Фиг. 5. Схема трансформатора рассчитанного в примере, приведенном в тексте.



Фиг. 6. Разрез катушки трансформатора рассчитанного в приведенном примере.

Для работы при напряжении сети 110 в необходимо сделать отвод обмотки:

$$688 \times \frac{110}{127} = 596 \text{ витков}$$

7. Число витков вторичной (повышающей) обмотки:

$$w_2 = \frac{U_2 \times 1000000}{2 \times (B \times Q_{\text{ж}} - l_o \times \Delta \times 100)} = \frac{700 \times 1000000}{2 \times (10000 \times 8,75 - 24 \times 2 \times 100)} = 4230$$

8. Число витков обмотки накала ламп:

$$w_3 = \frac{U_3 \times 1000000}{2 \times (B \times Q_{\text{ж}} - l_o \times \Delta \times 100)} = \frac{6,3 \times 1000000}{2 \times (10000 \times 8,75 - 24 \times 2 \times 100)} = 38$$

9. Число витков обмотки накала кенотрона:

$$w_4 = \frac{U_4 \times 1000000}{2 \times (B \times Q_{\text{ж}} - l_o \times \Delta \times 100)} = \frac{5 \times 1000000}{2 \times (10000 \times 8,75 - 24 \times 2 \times 100)} = 30$$

Схема рассчитанного нами трансформатора показана на фиг. 5. Сделаем проверку размещения обмоток трансформатора в окне сердечника.

10. Из эскиза сечения катушки (фиг. 6) находим длину обмотки:

$$y = h - 2\alpha = 60 - 2 \times 2 = 56 \text{ мм.}$$

где толщина каркаса $\alpha = 2 \text{ мм.}$

11. Число витков в слое первичной обмотки:

$$w'_1 = \frac{y}{d'_1} = \frac{56}{0,73} = 76$$

где диаметр провода первичной обмотки 0,69, с изоляцией $d' = 0,73 \text{ мм.}$

12. Количество слоев первичной обмотки:

$$n_1 = \frac{w_1}{w'_1} = \frac{688}{76} = 9$$

13. Высота первичной обмотки с учетом изоляционных прокладок β :

$$c_1 = n_1 \times (d'_1 + \beta) + \gamma = 9 \times (0,73 + 0,07) + 1,0 = 8,2$$

где толщина прокладок между слоями $\beta = 0,07 \text{ мм.}$, толщина прокладок между обмотками $\gamma = 1 \text{ мм.}$

14. Число витков в слое повышающей обмотки:

$$w'_2 = \frac{y}{d'_2} = \frac{56}{0,27} = 208$$

где $d'_2 = 0,27 \text{ мм.}$ для провода диаметром 0,25 мм.

15. Количество слоев повышающей обмотки:

$$n_2 = \frac{w_2}{w'_2} = \frac{4230}{208} = 21$$

16. Высота обмотки:

$$c_2 = n_2 \times (d'_2 + \beta) + \gamma = 21 \times (0,27 + 0,07) + 1,0 = 8,1$$

17. Число витков в слое обмотки накала ламп:

$$w'_3 = \frac{y}{d'_3} = \frac{56}{1,05} = 53$$

где $d'_3 = 1,05$ мм. для провода ПЭ диаметром 1 мм.

18. Количество слоев обмотки накала ламп:

$$n_3 = \frac{w_3}{w'_3} = \frac{38}{53} = 0,72$$

Следовательно, эта обмотка уложится в один слой.

19. Высота обмотки накала ламп:

$$c_3 = n_3 \times d'_3 + \gamma = 1,05 + 1,0 = 2,05 \approx 2 \text{ мм.}$$

20. Число витков в слое обмотки накала кенотрона:

$$w'_4 = \frac{y}{d'_4} = \frac{56}{1,22} = 46$$

Количество слоев данной обмотки также равно единице, так как $w_3 < w'_3$.

21. Высота обмотки накала кенотрона:

$$c_4 = n_4 \times d'_4 + \gamma = 1,22 + 1,0 \approx 2 \text{ мм.}$$

22. Полная высота всех обмоток трансформатора:

$$c' = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 = 8,2 + 8,1 + 2 + 2,2 = 20,5 \text{ мм.}$$

23. Зазор между обмоткой и сердечником:

$$\delta = c - (c' + \alpha) = 25 - (20,5 + 1,5) = 3 \text{ мм.}$$

что допустимо.

Вариант IV. Расчет маломощных трансформаторов.

источник: Дьяков В. И. "Типовые расчеты по электрооборудованию" 1991 г.

Маломощные однофазные и трехфазные трансформаторы (автотрансформаторы) применяют для освещения, питания цепей управления, в выпрямителях и различных электронных аппаратах. Расчет трансформаторов начинают с определения его вторичной мощности, ВА:

для однофазных трансформаторов:

$$S_2 = U_2 \times I_2$$

для трехфазных трансформаторов:

$$S_2 = 3 \times U_{2\phi} \times I_{2\phi}$$

где: U_2 – вторичное напряжение, в; $I_{2\phi}$ – вторичный фазный ток, А; I_2 – вторичный ток, А; $U_{2\phi}$ – вторичное фазное напряжение, в.

По известной вторичной мощности S_2 определяют первичную мощность трансформатора, ВА:

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta}$$

где η – кпд трансформатора, который можно принимать по табл. 1.

Поперечное сечение, мм^2 сердечника трансформатора Q_c можно определить по следующим эмпирическим (т. е. найденным опытным путем) формулам для трансформаторов стержневого типа (рис. 1, а):

$$Q_c = k \times \sqrt{\frac{S_1}{2 \times f}} \times 100$$

для трансформатора броневое типа (рис. 1, б):

$$Q_c = k \times \sqrt{\frac{S_1}{f}} \times 100$$

для трехфазных трансформаторов (рис. 1, в):

$$Q_c = k \times \sqrt{\frac{S_1}{3 \times f}} \times 100$$

где: f – частота тока в сети, Гц ; k – постоянная: 4 – 6 для масляных и 6 – 8 для воздушных трансформаторов.

Поперечное сечение стержня автотрансформаторов рассчитывается по вышеприведенным формулам, но постоянная k увеличивается на 15 – 20%. Сечение сердечника в мм^2 может быть выражено через его размеры $Q_c = a \times b$, где a – ширина пластин, мм ; b – толщина пакета пластин, мм .

Таблица 1. Рекомендуемые значения индукции, плотности тока и кВт трансформаторов

Мощность трансформатора ВА	Индукция B_c , Тл	кВт трансформатора η	Плотность тока, А/мм^2
10	1,1	0,82	4,8
20	1,25	0,85	3,9
40	1,35	0,87	3,2
70	1,40	0,89	2,8
100	1,35	0,91	2,5
203	1,25	0,93	2
400	1,15	0,95	1,6
700	1,10	0,96	1,3
1000	1,05	0,96	1,2
Более 1000	0,8 – 1,05	0,96–0,98	1,2

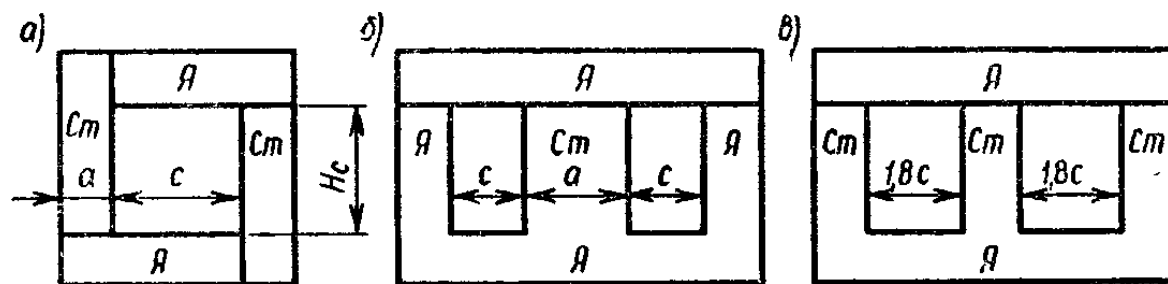


Рис. 1. Типы сердечников трансформаторов:
а – стержневой, б – броневой, в – трехфазный: Я – ярмо, ст – стержень.

Сечение стержня обычно имеет квадратную, прямоугольную или ступенчатую форму вписанную в окружность. Стержни прямоугольного сечения обычно применяют для трансформаторов до 700 ВА. Высоту, мм., прямоугольного стержня можно вычислить по формуле $H_c = (2.5 \div 3.5) \times a$.

Соотношение размеров сечения сердечника может находиться в пределах $b/a = 1.2 \div 1.8$. Ширину окна сердечника (рис. 4) принимают по формуле $c = H_c/m$, где m – коэффициент, учитывающий наивыгоднейшие размеры окна сердечника ($m = 2.5 \div 3$).

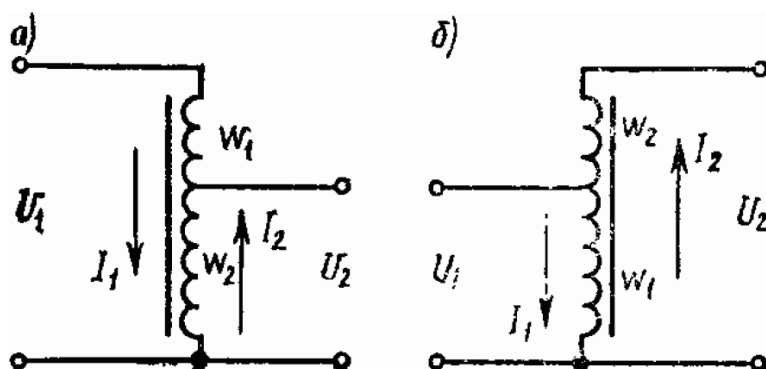


Рис. 2. Схемы понижающего (а) и повышающего (б) автотрансформаторов

Сечение ярма трансформатора с учетом изоляции между листами принимается: для трансформаторов стержневого типа:

$$Q_{\text{я}} = 1 \div 1.15 \times Q_c$$

для трансформаторов бронзового типа:

$$Q_{\text{я}} = \frac{1 \div 1.15}{2} \times Q_c$$

Сечение проводов для первичной и вторичной обмоток определяют в зависимости от тока в обмотках и допустимой плотности тока.

Токи первичной и вторичной обмоток определяют следующим образом, для однофазных трансформаторов:

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} \quad I_2 = \frac{S_2}{U_2}$$

для трехфазных трансформаторов:

$$I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3} \times U_{\text{Л1}}} \quad I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} \times U_{\text{Л2}}}$$

где: $U_{\text{Л1}}$ и $U_{\text{Л2}}$ – линейные напряжения первичной и вторичной обмоток.

При соединении обмоток в звезду: $U_{\text{Л}} = \sqrt{3} \times U_{\text{Ф}}$, а в треугольник $U_{\text{Л}} = U_{\text{Ф}}$, где $U_{\text{Ф}}$ фазное напряжение. Токи, А, в отдельных частях обмотки автотрансформатора (рис. 2) могут быть определены из выражений:

$$I_1 = \frac{S_2}{U_1} \times \eta; \quad I_2 = \frac{S_2}{U_2}$$

Сечения проводов первичной и вторичной обмоток определяют по формулам: для одно – и трехфазных трансформаторов:

$$s_1 = \frac{I_1}{\delta}; \quad s_2 = \frac{I_2}{\delta}$$

для понижающего автотрансформатора (рис. 1, а):

$$s_1 = \frac{I_1}{\delta}; s_2 = \frac{I_2 - I_1}{\delta}$$

для повышающего автотрансформатора (рис. 1, б):

$$s_1 = \frac{I_1 - I_2}{\delta}; s_2 = \frac{I_2}{\delta}$$

где: s_1 , и s_2 – сечения проводов первичной и вторичной обмоток, мм^2 ; δ – плотность тока в обмотке, А/мм^2 (принимается по табл. 14).

Число витков первичной и вторичной обмоток определяют по следующим формулам для одно – и трехфазных трансформаторов:

$$w_1 = \frac{U_1 \times 10^4}{2,22 \times B_c \times Q_c}; w_2 = w_1 \times \frac{U_2}{U_1}$$

для понижающего автотрансформатора (см. рис. 2,а):

$$w'_1 = w_1 + w_2 = \frac{U_1 \times 10^4}{2,22 \times B_c \times Q_c}; w_2 = \frac{U_1 \times 10^4}{2,22 \times B_c \times Q_c};$$

для повышающего автотрансформатора (см. рис. 2, б):

$$w_1 = \frac{U_1 \times 10^4}{2,22 \times B_c \times Q_c}; w_2 = \frac{(U_2 - U_1) \times 10^4}{2,22 \times B_c \times Q_c}$$

где B_c – магнитная индукция в сердечнике (см. табл. 1).

Для компенсации потери напряжения в проводах обмоток нужно увеличить число витков вторичных обмоток на 5 – 10%. Радиолюбители обычно определяют число витков на 1 в рабочего напряжения по упрощенной формуле:

$$w_0 = \frac{4500}{Q_c}$$

где 4500 – постоянная величина для трансформаторной стали (для 50 гц).

Далее определяют количество витков первичной и вторичной обмоток:

$$w_1 = w_0 \times U_1$$

$$w_2 = (1,05 \div 1,1) \times w_0 \times U_2$$

После расчета основных параметров трансформатора необходимо проверить, разместятся ли обмотки в окне выбранного магнитопровода. Пользуемся упрощенным способом проверки. Для этого по наружному диаметру провода и числу витков находим площадь, занимаемую каждой обмоткой в окне сердечника, затем складываем площади всех обмоток и полученную сумму сравниваем с площадью окна, т.е. определяем коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой:

$$k_0 = \frac{Q_{\text{ОБМ}}}{Q_0}$$

где площадь, занимаемая обмоткой:

$$Q_{\text{обм}} = d_{\text{и}}^2 \times w$$

$d_{\text{и}}$ – диаметр провода с изоляцией; w – число витков обмотки; $Q_0 = H_0 \times C$ – площадь окна сердечника трансформатора. Коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой для маломощных трансформаторов принимают $k_0 = 0,2 \div 0,4$.

Пример 1. Определить основные параметры понижающего трансформатора для радиоприемника, первичная обмотка которого на напряжение $U_1 = 220$ в и две вторичные обмотки на напряжение $U_2 = 6,3$ в и $U'_2 = 4$ в. Токи вторичных обмоток соответственно равны $I_2 = 4$ А и $I'_2 = 2$ А. Трансформатор однофазный стержневого типа.

1. На основании заданных нагрузок подсчитывают вторичную полную мощность трансформатора:

$$S_2 = 6,3 \times 4 + 4 \times 2 = 33,2 \text{ ВА}$$

2. Первичная полная мощность трансформатора:

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta} = \frac{33,2}{0,86} = 38,6 \text{ ВА}$$

3. Поперечное сечение сердечника трансформатора:

$$Q_c = k \times \sqrt{\frac{S_1}{2 \times f}} \times 100 = 8 \times \sqrt{\frac{38,6}{2 \times 50}} \times 100 = 497 \text{ мм}^2$$

При учете изоляции между листами сечение сердечника получается на 10% больше, т.е. $Q_c = 1,1 \times 497 = 547 \text{ мм}^2$. Принимают его размеры следующими: ширина стержня $a = 20$ мм, высота стержня $H_c = 2,5 \times a = 2,5 \times 20 = 50 \text{ мм}$., ширина окна $c = H_c / m = 50 / 2,5 = 20 \text{ мм}$., толщина пакета пластин $b = 30 \text{ мм}$. Фактическое сечение выбранного сердечника $Q_{\text{с.ф}} = a \times b = 20 \times 30 = 600 \text{ мм}^2$.

4. Определяют ток первичной обмотки:

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{38,6}{220} = 0,175 \text{ А}$$

5. Определяют сечение провода первичной и вторичной обмоток, исходя из плотности тока, равной $3,5 \text{ А/мм}^2$:

$$s_1 = \frac{I_1}{\delta} = \frac{0,175}{3,5} = 0,05 \text{ мм}^2; \quad s_2 = \frac{I_2}{\delta} = \frac{4}{3,5} = 1,14 \text{ мм}^2; \quad s'_2 = \frac{I'_2}{\delta} = \frac{2}{3,5} = 0,57 \text{ мм}^2$$

Принимают по табл. 2 для первичной и вторичной обмоток провод ПЭВ со следующими данными:

диаметры проводов без изоляции $d_1 = 0,265 \text{ мм}$., $d_2 = 1,25 \text{ мм}$., $d'_2 = 0,85 \text{ мм}$;

диаметры проводов с изоляцией $d_{\text{и}1} = 0,305 \text{ мм}$., $d_{\text{и}2} = 1,33 \text{ мм}$., $d'_{\text{и}2} = 0,91 \text{ мм}$.

6. Определяют число витков первичной и вторичной обмоток, приняв магнитную индукцию сердечника $B_c = 1,3 \text{ Тл}$:

$$w_1 = \frac{U_1 \times 10^4}{2,22 \times B_c \times Q_c} = \frac{220 \times 10^4}{2,22 \times 1,3 \times 600} = 1270 \text{ витков}$$

$$w_2 = w_1 \times \frac{U_2}{U_1} = 1270 \times \frac{6,3}{220} = 36 \text{ витков}, \quad w'_2 = w_1 \times \frac{U_2}{U_1} = 1270 \times \frac{4}{220} = 23 \text{ витка}$$

С учетом компенсации падения напряжения в проводах число витков вторичных обмоток принимают $w_2 = 1,1 \times 36 = 39$ витков, $w'_2 = 1,1 \times 23 = 25$ витков.

7. Проверяют, разместятся ли обмотки в окне сердечника. Площадь занимаемая первичной и вторичной обмотками:

$$Q_{\text{ОБМ}} = Q_{\text{ОБМ1}} + Q_{\text{ОБМ2}} + Q'_{\text{ОБМ2}} = 0,305^2 \times 1270 + 1,33^2 + 0,91^2 \times 25 = 207,82 \text{ мм}^2$$

Площадь окна сердечника: $Q_o = H_c \times c = 50 \times 20 = 1000 \text{ мм}^2$

Отношение расчетной и фактической площадей окна сердечника:

$$k_o = \frac{Q_{\text{ОБМ}}}{Q_o} = \frac{207,82}{1000} = 0,20782$$

Следовательно, обмотки свободно разместятся в окне выбранного сердечника трансформатора.

Пример 2. Рассчитать повышающий автотрансформатор по следующим данным: напряжение питающей сети $U_1 = 127 \text{ в}$, частота питающей сети $f = 50 \text{ гц}$, напряжение вторичной обмотки $U_2 = 220 \text{ в}$, мощность вторичной обмотки $S_2 = 220 \text{ ВА}$.

Решение.

1. Первичная полная мощность автотрансформатора:

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta} = \frac{220}{0,93} = 236,5 \text{ ВА}$$

2. Поперечное сечение сердечника трансформатора (трансформатор стержневого типа):

$$Q_c = 1,2 \times k \times \sqrt{\frac{S_1}{2 \times f}} \times 100 = 1,2 \times 8 \times \sqrt{\frac{236,5}{2 \times 50}} \times 100 = 1477 \text{ мм}^2$$

При учете изоляции между листами размер сечения сердечника получается на 10% больше, т. е. $Q_c = 1,1 \times 1477 = 1620 \text{ мм}^2$. Принимают $Q_{\text{с.ф}} = 30 \times 60 = 1800 \text{ мм}^2$.

3. Определяют токи первичной и вторичной обмоток:

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{236,5}{127} = 1,86 \text{ А}; \quad I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{220}{220} = 1 \text{ А}$$

4. Находят сечение первичной и вторичной обмоток:

$$s_1 = \frac{I_1 - I_2}{\delta} = \frac{1,86 - 1}{2} = 0,43 \text{ мм}^2, \quad s_2 = \frac{I_2}{\delta} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ мм}^2$$

По таблице номиналов обмоточных проводов определяют ближайший номинал и принимают провод марки ПЭВ-1 для обеих обмоток одинакового сечения, т. е.: $s_1 = s_2 = 0,5672 \text{ мм}^2$.

5. Определяем число витков отдельных секций обмотки:

$$w_1 = 4500 \times \frac{U_1}{Q_{сф}} = 4500 \times \frac{127}{1800} = 318 \text{ витков}$$

$$w_2 = \frac{U_2 - U_1}{U_2} \times w_1 = \frac{220 - 127}{220} \times 318 = 135 \text{ витков}$$

Вариант V. Основные определения и расчетные соотношения.
источник: Мазель К. Б. "Трансформаторы электропитания" 1982 г.
приводится с сокращениями.

Для полного расчета трансформатора необходимо выполнить сначала электрический, а затем конструктивный расчеты. Электрический расчет заключается в выборе схемы трансформатора, определении напряжений и токов обмоток, нахождении коэффициентов трансформации мощностей обмоток и габаритной мощности трансформатора. После конструктивного расчета уточняются падения напряжения в обмотках и потери в магнитопроводе и в меди, которые на этапе электрического расчета определяются приближенно.

Коэффициентом трансформации трансформатора n называется отношение числа витков вторичной обмотки w_2 к числу витков первичной обмотки w_1 .

Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, то различают несколько коэффициентов трансформации: n_2, n_3, n_4, \dots , определяемых как отношение чисел витков соответствующих обмоток w_2, w_3, w_4, \dots к числу витков первичной обмотки. На основании первого основного закона трансформации $E_2/E_1 = w_2/w_1$ можно представить коэффициенты трансформации как отношения соответствующих эдс:

$$n_2 = \frac{w_2}{w_1} = \frac{E_2}{E_1}; n_3 = \frac{w_3}{w_1} = \frac{E_3}{E_1}; n_4 = \frac{w_4}{w_1} = \frac{E_4}{E_1}$$

В тех случаях, когда значения эдс неизвестны, можно воспользоваться приближенными формулами, имея в виду, что эдс мало отличается от напряжения обмотки ($U \approx E$):

$$n_2 \approx \frac{U_2}{U_1}; n_3 \approx \frac{U_3}{U_1}$$

В соответствии со вторым основным законом трансформации ($I_1/I_2 = w_2/w_1$) можно получить следующее соотношение между токами первичной и вторичной обмоток: $I_1 \approx I_2 \times n_2$. Знак приближенного равенства поставлен в потому, что в этом выражении не учитывается ток холостого хода трансформатора. Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, то ток первичной обмотки состоит из суммы токов, вызванных токами каждой вторичной обмотки:

$$I_{\text{общ}} = I_{1,2} + I_{1,3} + I_{1,4} + \dots = I_{2n_2} + I_{3n_3} + I_{4n_4} + \dots$$

В выражении также не учитывается ток холостого хода. Сопоставляя приведенные выражения, легко получить известное соотношение:

$$I_{\text{общ}} \times E \approx I_2 \times E_2 + I_3 \times E_3 + I_4 \times E_4 + \dots$$

Учитывая $U \approx E$, можно записать:

$$I_{\text{общ}} \times U \approx I_2 \times U_2 + I_3 \times U_3 + I_4 \times U_4 + \dots$$

Вышеприведенные выражения формулируются следующим образом: мощность первичной обмотки равна сумме мощностей всех вторичных обмоток (без учета тока холостого хода). Здесь необходимо сделать важную оговорку. Выражение справедливо, когда форма тока первичной обмотки совпадает с формой тока вторичной обмотки (или с формой, полученной в результате суммирования токов всех вторичных обмоток). Это условие выполняется при нагрузке вторичных обмоток на линейные цепи, например на цепи накала ламп, на нагревательные приборы, на двигатели переменного тока.

Если же формы токов первичной и вторичной обмоток не совпадают, то мощности этих обмоток, как правило, не равны между собой. Различная форма токов в обмотках может наблюдаться в тех случаях, когда в цепь вторичной (или первичной) обмотки включены нелинейные элементы, в частности приборы с односторонней проводимостью – диоды, тиристоры, транзисторы. Поэтому у трансформаторов, работающих в некоторых (но не во всех!) схемах выпрямителей и транзисторных преобразователей, мощности первичной и вторичной обмоток отличаются друг от друга.

Трансформаторы характеризуются мощностью, которую они могут передать в нагрузку. Эта мощность измеряется в вольт – амперах, а не в ваттах по следующей причине. Как известно, мощность в ваттах определяется произведением напряжения на силу тока и на косинус угла сдвига фаз между ними: $P = U_2 \times I_2 \times \cos\varphi$. Если нагрузка кроме активного сопротивления содержит индуктивность или емкость, то $\cos\varphi$ будет меньше единицы и действительная мощность (в ваттах), выделяемая в нагрузке, будет меньше произведения $U_2 \times I_2$. Однако обмотка трансформатора, имеющая напряжение U_2 , будет при этом нагружена током I_2 , независимо от значения $\cos\varphi$. Иначе говоря, трансформатор может отдать в нагрузку ток I_2 при напряжении U_2 независимо от того, какова будет действительная мощность, выделяемая в нагрузке. Поэтому произведение $U_2 \times I_2$, называемое полной мощностью и измеряемое в вольт – амперах (ВА), характеризует трансформатор с точки зрения мощности, которую он может отдать в нагрузку.

Габаритные размеры трансформатора зависят от так называемой габаритной мощности трансформатора, которая равна полусумме мощностей всех его обмоток:

$$P_{\text{ГАБ}} = \frac{U_1 \times I_{1\text{ОБЩ}} + U_2 \times I_2 + U_3 \times I_3 + \dots}{2}$$

Очевидно, что если трансформатор имеет две обмотки, мощности которых равны между собой, то габаритная мощность такого трансформатора будет равна мощностям первичной или вторичной обмоток:

$$P_{\text{ГАБ}} = U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2$$

Если трансформатор имеет отводы от первичной обмотки (например, для включения в сеть 127 или 220 в) или от вторичных обмоток, то для расчета габаритной мощности в следует подставлять мощности всех частей обмоток, находящихся между отводами трансформатора, независимо от того, работают ли они в данном случае или нет.

Конструктивный расчет трансформатора заключается в выборе магнитопровода и определении чисел витков обмоток и диаметров проводов. Основное соотношение, связывающее число витков с напряжением и другими параметрами трансформатора, имеет вид:

$$w = \frac{E \times 10^4}{4,44 \times f \times B \times Q_c \times k_c}$$

где f – частота питающей сети, $гц$; B – магнитная индукция в магнитопроводе, $Тл$; Q_c – полное сечение стержня магнитопровода, $см^2$; k_c – коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

Индукция B представляет собой число линий магнитного потока, Φ , проходящих через один квадратный сантиметр сечения магнитопровода; единицей магнитной индукции является тесла ($Тл$). Значения B выбирают чаще всего в пределах от 0,8 до 1,2 $Тл$.

Чем больше мощность трансформатора, тем меньшее значение индукции надо выбирать. Значения B в зависимости от некоторых параметров трансформатора приводятся в табл. 8. Увеличение индукции B свыше рекомендуемых значений ведет к перегреву трансформатора.

Сечение стержня Q_c определяют как произведение $a \times c$ для магнитопроводов стержневого и броневого типов, для кольцевых магнитопроводов (см. рис. 1):

$$(D - d) \times \frac{c}{2}$$

Коэффициент заполнения магнитопровода сталью k_c показывает, какую часть полного сечения стержня Q_c занимает магнитный материал (сталь). Имеется в виду, что остальная часть сечения приходится на изоляцию пластин или ленты. Для трансформаторов из материала толщиной не менее 0,08 мм.:

$$k_c = \frac{Q_{\text{СТАЛИ}}}{Q_c} = 0,85 \div 0,95$$

для кольцевых магнитопроводов из тонкой ленты: $k_c = 0,74 \div 0,75$.

Таблица 1. Рекомендуемые значения индукции, плотности тока, $k\eta$ и коэффициента заполнения окна.

Габаритная мощность $P_{\text{Габ}}$ ВА	Индукция B , $Tл$		Плотность тока $j, A/мм^2$		$k\eta$ η		Коэффициент заполнения окна k_m
	Частота сети		Частота сети		Частота сети		
	50 $гц$	400 $гц$	50 $гц$	400 $гц$	50 $гц$	400 $гц$	
10	1,10	1,0	4,8	7	0,82	0,80	0,23
20	1,25	1,1	3,9	6	0,85	0,83	0,26
40	1,35	1,2	3,2	5	0,87	0,85	0,28
70	1,40	1,25	2,8	4,2	0,89	0,87	0,30
100	1,35	1,2	2,5	3,8	0,91	0,89	0,31
200	1,25	1,1	2	3,1	0,93	0,91	0,32
400	1,15	1,0	1,6	2,5	0,95	0,92	0,33
700	1,10	0,9	1,3	2,1	0,96	0,93	0,33
1000	1,05	0,8	1,2	1,8	0,96	0,93	0,34

Примечание. При $f = 50$ $гц$ обычно используется электротехническая сталь толщиной 0,35 – 0,5 мм., а при $f = 400$ $гц$ 0,08 – 0,2 мм. Коэффициент k_m дан для проводов с эмалевой изоляцией; для проводов с шелковой или хлопчатобумажной изоляцией снижается в 1,2 – 1,5 раза.

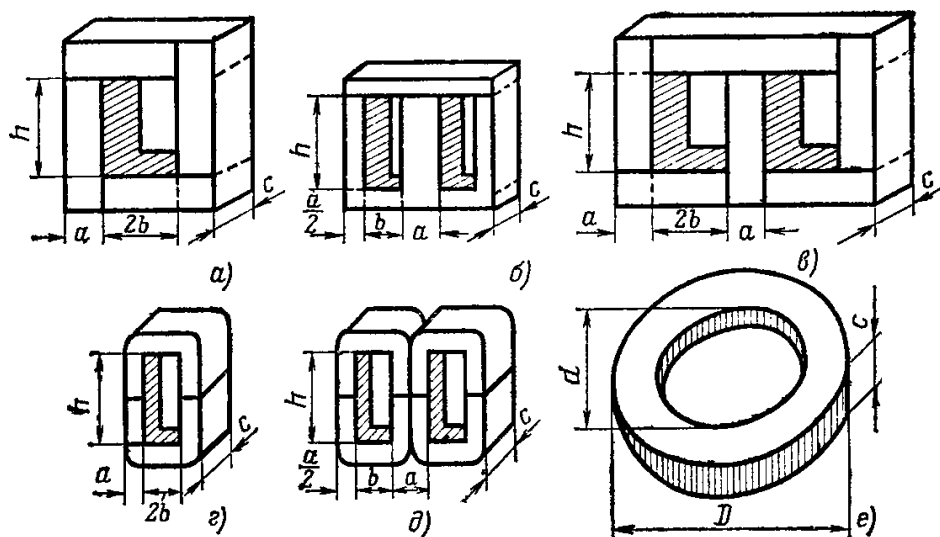


Рис. 1. Основные типы магнитопроводов.

Можно сделать некоторые важные выводы. Во первых, число витков w пропорционально эдс соответствующей обмотки E , во вторых, чем больше частота сети f и сечение стержня магнитопровода Q_c , тем меньше витков будут иметь обмотки. Для трансформаторов питания, работающих от сети с частотой 50 гц, формулу нахождения витков можно значительно упростить:

$$w \approx 45 \times \frac{E}{Q_c}$$

Так как при расчете трансформатора обычно задают напряжение обмоток U , а не эдс E , то в первом приближении можно воспользоваться выражениями:

$$\begin{aligned} \text{для первичной обмотки } E_1 &= 0,956 \times U_1 \\ \text{для вторичных обмоток } E_2 &= 1,05 \times U_2 \end{aligned}$$

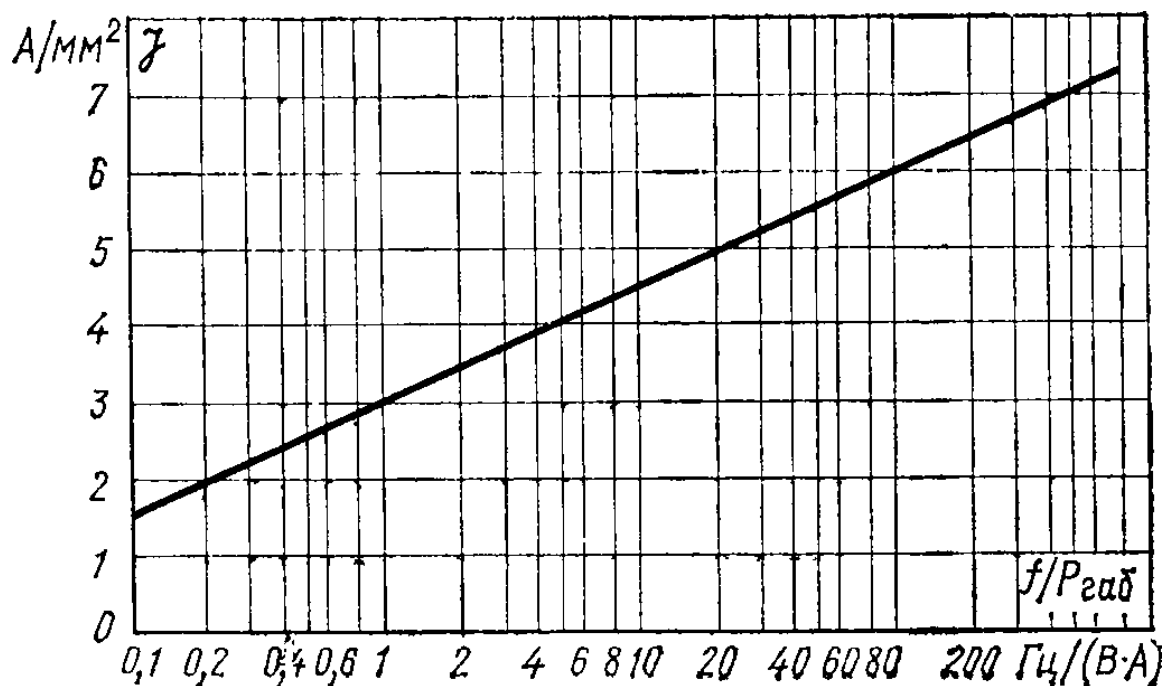


Рис. 2. График зависимости плотности тока в обмотках j от отношения $f / P_{габ}$ для трансформаторов преобразователей.

Диаметр проводов, мм., обмоток (без изоляции) определяют из выражения:

$$d = 1,13 \times \sqrt{\frac{I}{j}}$$

где j – плотность тока в обмотках, измеряемая в амперах на квадратный миллиметр сечения провода (без изоляции).

Значения допустимых плотностей тока j , зависящие от мощности трансформатора питания и других его параметров, приводятся в табл. 1. Значение допустимой плотности тока для тороидального трансформатора, работающего в схемах транзисторных преобразователей в зависимости от отношения частоты преобразователя к габаритной мощности трансформатора дано на графике рис. 2.

При увеличении плотности тока свыше допустимой трансформатор будет перегреваться.

Для маломощных трансформаторов, работающих от сети с частотой 50 гц, можно воспользоваться приближенной формулой:

$$d \approx 0,7 \times \sqrt{I}$$

Выбор магнитопровода производится с помощью выражения:

$$Q_c \times Q_o = \frac{P_{\text{ГЛАВ}} \times 10^2}{2,22 \times f \times B \times \eta \times s \times k_c \times k_m}$$

где Q_o – площадь окна магнитопровода, приходящаяся на обмотки одного стержня, см²; η – коэффициент полезного действия трансформатора; s – число стержней, несущих обмотки; k_m – коэффициент заполнения окна медью обмотки.

Остальные обозначения известны из предыдущего текста.

Площадь окна Q_o магнитопроводов стержневого и броневого типов равна $b \times h$, а у кольцевых сердечников – $\pi \times d^2/4$ (см. рис. 1).

Коэффициент полезного действия (η) трансформатора, представляющий собой отношение отдаваемой мощности к потребляемой, обычно довольно высок и лежит в пределах 0,85 – 0,95; чем больше мощность, трансформатора, тем выше его η .

Число стержней s трансформатора броневого типа равно единице, стержневого типа (с двумя катушками) – двум и трехфазного – трем. Для тороидальных трансформаторов $s = 1$. Магнитопроводы стержневого типа ($s = 2$) обычно применяют при мощностях более 250 – 300 ВА и частоте сети 50 гц, а также в тех случаях, когда нужно улучшить охлаждение обмоток.

Коэффициент заполнения окна k_m показывают, какую часть площади окна магнитопровода занимает чистая медь проводов обмотки (без изоляции). Так как кроме изоляции проводов (обычно эмалированных) катушка имеет межслоевую и межобмоточную изоляцию, а намотка производится на гильзу или на каркас, то все эти виды изоляции занимают значительную часть площади окна и коэффициент заполнения окна медью получается небольшим. Обычно:

$$k_m = \frac{Q_{\text{МЕДИ}}}{Q_o} = 0,25 \div 0,35$$

Чем больше мощность трансформатора, тем больше k_m . Значения η и коэффициента заполнения окна, зависящие от некоторых параметров трансформатора, приводятся в табл. 1.

Если маломощный трансформатор работает от сети с частотой 50 гц, то формулу выбора магнитопровода можно упростить:

для трансформаторов броневого конструкции: $Q_c \times Q_o \approx 1,15 \times P_{\text{ГЛАБ}}$
для трансформаторов стержневой конструкции: $Q_c \times Q_o \approx 0,6 \times P_{\text{ГЛАБ}}$

Значение габаритной мощности $P_{\text{ГЛАБ}}$ в формулах указывается в вольт – амперах.

Зная произведение $Q_c \times Q_o$, можно выбрать стандартный магнитопровод, при этом выбранный магнитопровод должен иметь произведение $Q_c \times Q_o$ не меньше расчетного значения. Если имеется возможность изготовить пластины из трансформаторной стали, то размеры магнитопровода можно определить с помощью формул, в которых все линейные размеры указаны в сантиметрах (см. рис. 1):

$$a \approx 0,7 \times \sqrt[4]{Q_c \times Q_o} \quad b = a, \quad c = 1,5 \times a, \quad h = 2,5 \times a$$

Так как сечение стержня Q_c и площадь окна Q_o в конечном счете определяют габаритные размеры трансформатора, то выражение выбора магнитопровода показывает связь этих размеров с параметрами трансформатора.

Ввиду того что рекомендуемые значения индукции B и плотности тока j лежат в сравнительно узких пределах, основное влияние на габаритные размеры оказывают габаритная мощность трансформатора $P_{\text{ГЛАБ}}$ и частота питающей сети f . С увеличением $P_{\text{ГЛАБ}}$ размеры трансформатора растут, а с увеличением f снижаются. Последнюю (частотную) зависимость часто используют для уменьшения массы и объема специальной аппаратуры.

Так, источники вторичного электропитания самолетной аппаратуры, для которых уменьшение массы и габаритов играет весьма существенную роль, питаются от специальных самолетных генераторов, которые вырабатывают переменное напряжение с частотой 400 гц. Такое повышение частот, (по сравнению с частотой 50 гц) не только значительно уменьшает массу трансформаторов (в 4 – 5 раз), но так же резко снижает массу и объем сглаживающих фильтров выпрямителей.

После конструктивного расчета трансформатора по приближенным формулам полезно проверить коэффициент заполнения окна медью k_M . Для трансформаторов броневого и стержневой конструкций:

$$k_M = 8 \times 10^{-3} \times \frac{d_1^2 \times w_1 + d_2^2 \times w_2 + d_3^2 \times w_3 + \dots}{Q_o}$$

Для проводов с эмалевой изоляцией значение k_M не должно превышать 0,3.

Для тороидальных трансформаторов на кольцевых магнитопроводах с внутренним диаметром

$$k_M = \frac{d_1^2 \times w_1 + d_2^2 \times w_2 + d_3^2 \times w_3 + \dots}{100 \times d^2}$$

В этом случае коэффициент k_M не должен превышать 0,2.

Если рассчитанные коэффициенты заполнения превышают указанные значения (0,3 и 0,2), то это указывает на трудность (или невозможность) размещения обмоток в окне магнитопровода. В таком случае следует сделать перерасчет трансформатора для уменьшения числа витков или диаметра проводов обмоток; для этого можно немного увеличить индукцию B , или плотность тока j или то и другое вместе.

В тех случаях, когда необходимо повысить или понизить имеющееся напряжение на 30 – 40%, часто применяют автотрансформатор, который представляет собой трансформатор с одной обмоткой, имеющей отводы.

При использовании автотрансформатора надо иметь в виду, что напряжение питающей сети (например, 127 или 220 в) будет иметь гальваническую (непосредственную) связь с нагрузкой. Если такая связь недопустима, то автотрансформатор применять нельзя. Автотрансформаторы имеют меньшие габариты по сравнению с трансформаторами при одинаковой мощности в нагрузке. Это преимущество особенно отчетливо проявляется в автотрансформаторах, предназначенных для получения небольших повышений или понижений напряжения.

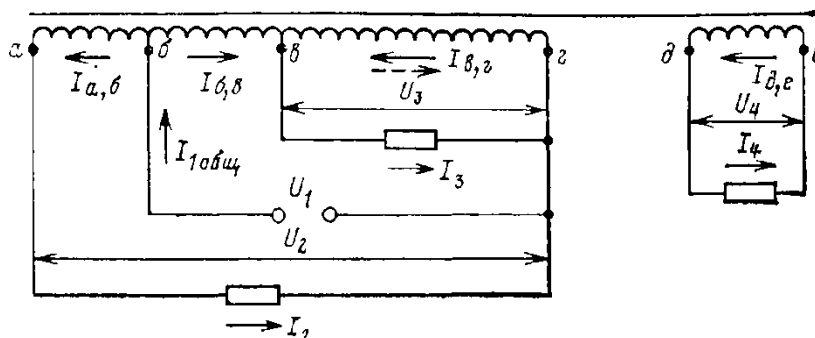


Рис. 3. Схема универсального автотрансформатора.

На рис. 3 показана схема универсального автотрансформатора, у которого напряжение U_1 может повышаться до значения U_2 (вывода а, г) и понижаться до значения U_3 (выводы в, г). Кроме того, имеется дополнительная изолированная обмотка с напряжением U_4 (выводы д, е). Габаритная мощность такого автотрансформатора рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{ГАБ}} = \frac{(U_2 - U_1) \times I_2 + (U_1 - U_3) \times I_{б,в} + U_3 \times I_{в,г} + U_4 \times I_4}{2}$$

где $I_{б,в} = I_{\text{общ}} - I_2$; $I_{в,г} = I_3 - I_{б,в}$ – абсолютное значение разности (без учета знака); $I_{\text{общ}}$ вычисляется по ранее приведенной формуле.

Если автотрансформатор имеет только повышающую обмотку, т. е. $U_3 = U_4 = 0$ и $I_3 = I_4 = 0$, то:

$$P_{\text{ГАБ}} = U_2 \times I_2 \times \left(n_2 - \frac{1}{n_2} \right)$$

Если имеется только понижающая обмотка, т. е. $U_2 = U_4 = 0$ и $I_2 = I_4 = 0$, то:

$$P_{\text{ГАБ}} = U_3 \times I_3 \times (1 - n_3)$$

Ток $I_{в,г}$ на участке вг обмотки может или совпадать по направлению с током $I_{б,в}$ на участке бв или иметь противоположное направление. Совпадение направлений токов будет в том случае, когда ток I_3 меньше тока $I_{б,в}$ (пунктирная стрелка на рис. 3); противоположные направления токов будут, когда ток I_3 больше тока $I_{б,в}$ (сплошная стрелка на рис. 3). Так как направление тока не влияет на габаритную мощность трансформатора, то в (27) следует подставлять значение тока $I_{в,г}$ без учета знака (абсолютное значение).

При расчете диаметров проводов автотрансформатора следует подставлять значения токов $I_{а,б}$, $I_{б,в}$, $I_{в,г}$ и $I_{д,е}$ соответствующих участков обмотки. Очевидно, что $I_{а,б} = I_2$; $I_{д,е} = I_4$, а формулы для расчета $I_{б,в}$ и $I_{в,г}$ даны выше.

В остальном расчет автотрансформатора не отличается от расчета обычного трансформатора.

Последовательное и параллельное включение обмоток трансформатора применяется очень часто.

Последовательное включение нескольких обмоток используется для получения более высокого напряжения, чем это может обеспечить одна обмотка, а параллельное включение – для увеличения тока нагрузки по сравнению с допустимым током нагрузки одной обмотки.

При последовательном включении обмоток общее напряжение равно сумме напряжений отдельных обмоток, а ток нагрузки не должен превышать тока обмотки с наименьшим допустимым током.

Параллельно можно включать только те обмотки, которые имеют одинаковые напряжения, при этом общий допустимый ток нагрузки будет равен сумме токов каждой обмотки, а напряжение – напряжению одной обмотки.

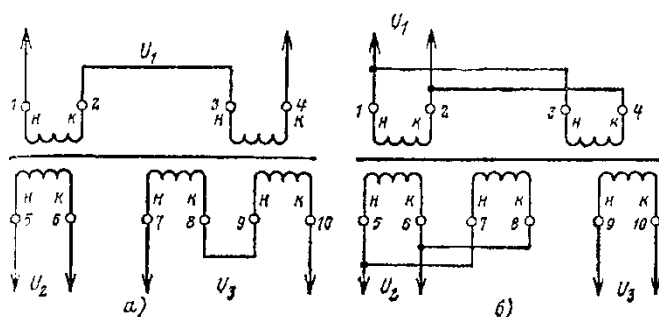


Рис. 4. Пример последовательного (а) и параллельного (б) соединений обмоток трансформаторов броневого конструкции.

При последовательном и параллельном соединении обмоток необходимо соблюдать некоторые правила, обеспечивающие одинаковые направления магнитных потоков, создаваемых этими обмотками.

Если трансформатор имеет броневою конструкцию и все обмотки намотаны в одну сторону (что чаще всего встречается на практике), то при последовательном включении нужно соединять конец одной обмотки с началом другой (рис. 4, а). При параллельном включении нужно соединять между собой одноименные выводы, т. е. начало с началом и конец с концом (рис. 4, б). В трансформаторах, имеющих нумерацию выводов, начало обмотки имеет обычно меньший порядковый номер, а конец – больший. Если трансформатор имеет стержневую конструкцию (с двумя катушками, намотанными в одну сторону), то при последовательном включении обмоток, расположенных на разных стержнях, необходимо соединять между собой одноименные выводы обмоток, т. е. начало с началом или конец с концом (рис. 5, а). При параллельном включении обмоток, расположенных на разных стержнях, следует соединять между собой разноименные выводы обмоток, т. е. начало с концом и конец с началом (рис. 5, б). Если же обмотки расположены на одном из двух стержней, то действует правило соединений для броневого конструкции.

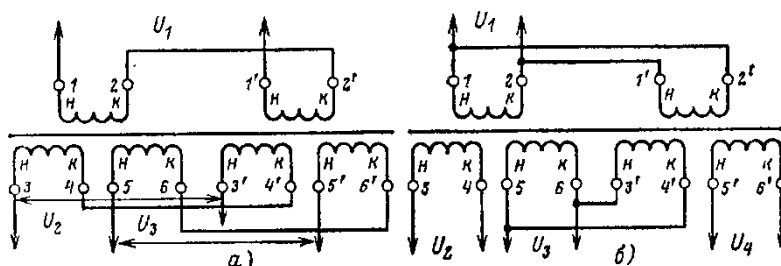


Рис. 5. Пример последовательного (а) и параллельного (б) соединений обмоток трансформаторов стержневой конструкции.

Обмотки с выводами 1 – 6 расположены на одном стержне, а с выводами 1' – 6' – на другом.

В некоторых случаях требуется понизить напряжение той или иной обмотки. Для этого можно использовать последовательное встречное включение обмоток, при котором их напряжения вычитаются. Очевидно, что при встречном включении выводы обмоток должны соединяться между собой способом, противоположным указанному выше (например, конец с концом, а не конец с началом другой обмотки).

Указанные способы соединения обмоток обеспечивают нужное направление магнитных потоков в стержнях магнитопроводов. В трансформаторах броневой конструкции магнитные потоки, создаваемые обмотками, совпадают по направлению в стержне, а в трансформаторах стержневой конструкции магнитные потоки в стержнях имеют противоположные направления, т. е. магнитный поток одного стержня является продолжением магнитного потока другого.

Подобным же образом можно соединять между собой последовательно и параллельно обмотки, размещенные на разных трансформаторах. При последовательном включении вторичных обмоток необходимо соединять разноименные выводы обмоток, а при параллельном – одноименные, при этом первичные обмотки трансформаторов надо соединять параллельно (одноименными выводами или одинаковыми номерами выводов).

Параллельное и последовательное включение обмоток часто применяется при питании трансформатора от сетей с разными напряжениями; например, при питании от сети 127 в применяется параллельное включение половин первичной обмотки, а при напряжении 220 в – последовательное включение.

В момент включения трансформатора в питающую сеть по первичной обмотке трансформатора протекает кратковременный импульс тока, превышающий расчетное значение тока обмотки. Возникновение импульса связано с тем, что магнитный поток, возникающий под действием приложенного напряжения, достигает расчетного значения, соответствующего выбранной индукции B , не сразу, а постепенно (в течение нескольких периодов переменного напряжения). Поэтому эдс первичной обмотки, противодействующая приложенному напряжению, возникает также не сразу, а постепенно. Так как приложенное напряжение сети в течение некоторого времени остается неуравновешенным, то это вызывает

(на такое же время) увеличение тока, отбираемого трансформатором из питающей сети. Кратковременное увеличение тока при включении трансформатора может привести к перегоранию предохранителя в цепи первичной обмотки, если он выбран без достаточного запаса по току. Рекомендуется выбирать предохранитель на ток в 1,5 – 2 раза больше расчетного значения тока первичной обмотки.

Примеры расчетов трансформаторов.

Рассмотрим несколько примеров расчета маломощных трансформаторов питания. Справочные данные, необходимые для расчетов, приведены в соответствующих таблицах. При расчете трансформаторов, нагруженных на схемы выпрямителей, необходимо иметь в виду, что параметры трансформаторов (напряжения и токи обмоток) будут отличаться друг от друга в зависимости от типа сглаживающего фильтра выпрямителя. При равенстве выпрямленных напряжений и токов и при одинаковых схемах выпрямления трансформатор, работающий на выпрямитель с фильтром, начинающимся с емкости, будет иметь меньшие напряжения, но большие токи обмоток, чем при работе на выпрямитель с фильтром, начинающимся с индуктивности. Эти особенности учтены в формулах табл. 1.

Ток первичной обмотки, вычисляемый по формулам табл. 2, обозначен как $I_{1,2}$, что соответствует схемам трансформаторов, имеющих по две обмотки. Если трансформатор имеет третью, четвертую и другие обмотки, необходимо для определения общего тока первичной обмотки вычислить значения токов, вызываемых всеми обмотками, т. е. $I_{1,2}$, $I_{1,3}$, $I_{1,4}$ и т. д., и просуммировать эти токи.

Пример 1. Рассчитать трансформатор, питаемый от сети $U_1 = 127$ в, 50 гц и нагруженный: на цепь накала с напряжением $U_2 = 6,3$ в при токе $I^2 = 1$ А; на двух-полупериодный выпрямитель, работающий на индуктивность, с выходным напряжением $U_0 = 6$ в при токе нагрузки $I_0 = 2,5$ А; на мостовую схему выпрямителя, работающего на емкость, с выходным напряжением $U_0 = 60$ в при токе нагрузки $I_0 = 0,1$ А. Схема трансформатора показана на рис. 6, а.

1. Определяем напряжения и эдс обмоток:

$$E_1 \approx 0,95 \times U_1 = 0,95 \times 127 = 121 \text{ в}, \quad E_2 \approx 1,05 \times U_2 = 1,05 \times 6,3 = 6,6 \text{ в}$$

Из табл. 2:

$$U_3 = 1,1 \times 6 + 1 = 7,6 \text{ в}, \quad E_3 \approx 1,05 \times U_2 = 1,05 \times 7,6 = 8 \text{ в}$$

Из таблицы 2:

$$U_4 \approx \frac{60 + 2}{1,1} = 56 \text{ в}, \quad E_4 \approx 1,05 \times 56 = 59 \text{ в}$$

2. Находим токи обмоток (действующее значения):

$$I_{1,2} = 1 \times \frac{6,6}{121} = 0,055$$

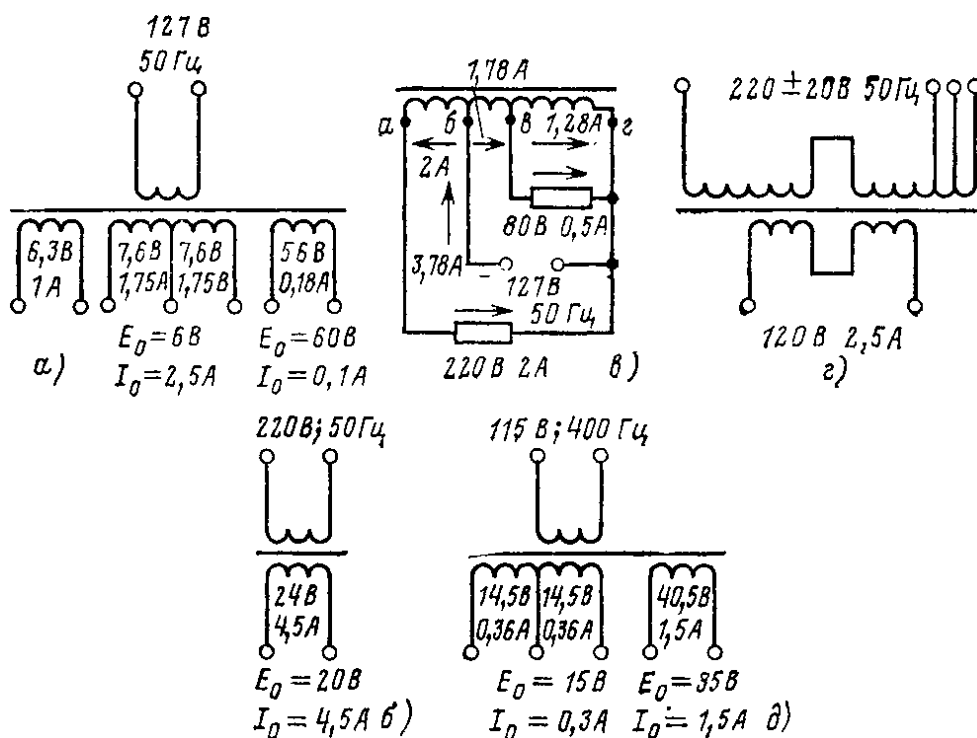


Рис. 6. Схемы трансформаторов к примерам расчетов.

Согласно формулам в таблице:

$$I_3 \approx 0,7 \times 2,5 = 1,75 \text{ А} \quad I_{1,3} \approx 2,5 \times \frac{8}{121} = 0,165 \text{ А} \quad I_{1,4} \approx 1,8 \times 0,1 \times \frac{59}{121} = 0,088 \text{ А}$$

По формуле:

$$I_{1\text{общ}} \approx 0,055 + 0,165 + 0,088 = 0,31 \text{ А}$$

Габаритная мощность:

$$P_{\text{Габ}} = \frac{127 \times 0,31 + 6,3 \times 1 + 7,6 \times 1,75 \times 2 + 56 \times 0,18}{2} = 41 \text{ ВА}$$

При расчете мощности третьей обмотки введен коэффициент 2, так как эта обмотка состоит из двух половин с напряжением 7,6 в и током 1,75 А каждая.

4. По приближенной формуле находим (для магнитопровода броневого типа):

$$Q_c \times Q_o \approx 1,15 \times 41 = 47 \text{ см}^4$$

Выбираем магнитопровод Ш20×25, имеющий $Q_c Q_o = 50 \text{ см}^4$ (ближайшее большее). У этого магнитопровода $Q_c = 5 \text{ см}^2$, $Q_o = 10 \text{ см}^2$.

5. Находим числа витков обмоток по упрощенной формуле:

$$w_1 \approx 45 \times \frac{121}{5} = 1090 \text{ витков} \quad w_2 \approx 45 \times \frac{6,6}{5} = 59 \text{ витков}$$

$$w_3 \approx 45 \times \frac{8}{5} = 72 \times 2 \text{ витков} \quad w_4 \approx 45 \times \frac{59}{5} = 530 \text{ витков}$$

Находим диаметры проводов (без изоляции) по приближенной формуле:

$$d_1 \approx 0,7 \times \sqrt{0,31} = 0,39 \approx 0,38 \quad d_2 \approx 0,7 \times \sqrt{1} = 0,7 \approx 0,69$$

$$d_3 \approx 0,7 \times \sqrt{1,75} = 0,92 \approx 0,93 \quad d_4 \approx 0,7 \times \sqrt{0,18} = 0,296 \approx 0,29$$

Диаметры проводов округлены до стандартных.

7. Проверяем коэффициент заполнения окна медью обмотки по формуле:

$$k_M = 8 \times 10^{-3} \times \frac{0,38^2 \times 1090 + 0,69^2 \times 59 + 0,93^2 \times 72 \times 20,29^2 \times 530}{10} = 0,282$$

Так как k_M не превышает значения 0,3, то обмотки с межслоевой и межобмоточной изоляцией должны разместиться в окне сердечника.

Пример 2. Рассчитать трансформатор, питаемый от сети $U_1 = 220 \text{ в}$, 50 гц и нагруженный на мостовую схему выпрямителя, работающего на индуктивность, с выходным напряжением $U_0 = 20 \text{ в}$ при токе нагрузки $I_0 = 4,5 \text{ А}$. Схема трансформатора показана на рис. 6, б.

1. Определяем напряжения и эдс обмоток:

$$E_2 \approx 0,95 \times 220 = 209 \text{ в}$$

Из табл. 2:

$$U_2 \approx 1,1 \times 20 + 2 = 24 \text{ в} \quad E_2 \approx 1,05 \times 24 = 25 \text{ в}$$

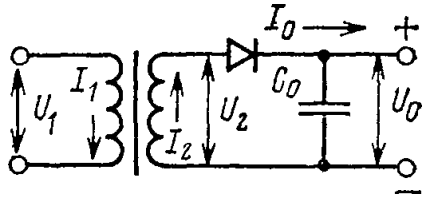
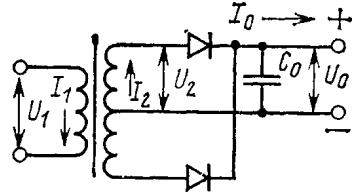
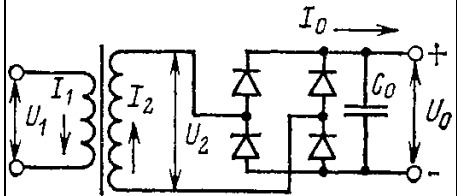
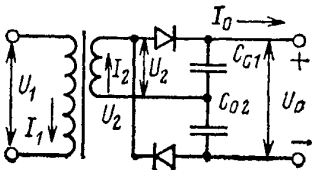
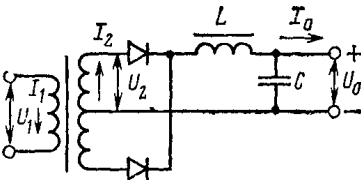
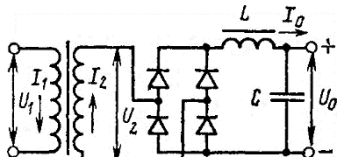
2. Находим токи обмоток, согласно таблице 2:

$$I_2 = 4,5 \text{ А} \quad I_{1,2} = 4,5 \times \frac{25}{209} = 0,54 \text{ А}$$

В данном случае:

$$I_1 \approx I_{1,2} = 0,54 \text{ А}$$

Таблица 2. Напряжения и токи обмоток трансформаторов работающих в схемах.

Наименование схемы выпрямителя.	Схема выпрямителя работающего на фильтр начинающийся с емкости.	Напряжение вторичной обмотки	Ток вторичной обмотки I_2	Ток первичной обмотки $I_{1,2}$
Однополупериодная		$\frac{U_0 + 1}{1,1}$	$2,5 \times I_2$	$2,3I_0 \times \frac{U_2}{U_1}$
Двухполупериодная со средним выводом вторичной обмотки.		$\frac{U_0 + 1}{1,1}$	$1,2 \times I_2$	$1,7I_0 \times \frac{U_2}{U_1}$
Однофазная мостовая.		$\frac{U_0 + 2}{1,1}$	$1,8 \times I_2$	$1,8I_0 \times \frac{U_2}{U_1}$
Симметричная схема удвоения напряжения.		$\frac{\frac{U_0}{2} + 1}{1,1}$	$3,5 \times I_2$	$3,5I_0 \times \frac{U_2}{U_1}$
Наименование схемы выпрямителя.	Схема выпрямителя работающего на фильтр начинающийся с индуктивности.	Напряжение вторичной обмотки U_2	Ток вторичной обмотки I_2	Ток первичной обмотки $I_{1,2}$
Однополупериодная	не применяется	–	–	–
Двухполупериодная со средним выводом вторичной обмотки.		$1,1U_0 + 1$	$0,7 \times I_0$	$I_0 \times \frac{U_2}{U_1}$
Однофазная мостовая.		$1,1U_0 + 2$	I_0	$I_0 \times \frac{U_2}{U_1}$

3. Габаритная мощность трансформатора:

$$P_{\text{Габ}} = \frac{220 \times 0,54 + 24 \times 4,5}{2} = 114 \text{ ВА}$$

Определение произведения $Q_c \times Q_0$. Для этого предварительно найдем значения из таблицы 1: $B, j, k_m, B = 1,3 \text{ Тл}, j = 2,4 \text{ А/мм}^2, \eta = 0,91, k_m = 0,31$. Выбираем магнитопровод броневого типа ($s = 1$), значение k_c пример равным 0,93, тогда:

$$Q_c \times Q_o = \frac{114 \times 10^2}{2,22 \times 50 \times 1,3 \times 2,4 \times 0,91 \times 1 \times 0,93 \times 0,31} = 125 \text{ см}^4$$

Выбираем магнитопровод Ш25×32, имеющий $Q_c \times Q_o = 125 \text{ см}^4$; $Q_c = 8 \text{ см}^2$; $Q_o = 15,6 \text{ см}^2$; а $a = b = 2,5 \text{ см}$; $h = 6,25 \text{ см}$; $c = 3,2 \text{ см}$; $l_c = 21,4 \text{ см}$; $l_m = 19,3 \text{ см}$; $G = 1,17 \text{ кг}$.

5. Находим числа витков обмоток:

$$w_1 = \frac{209 \times 10^4}{4,44 \times 50 \times 1,3 \times 8 \times 0,93} \approx 1000 \text{ витков}; w_2 = 1000 \times \frac{25}{209} = 120 \text{ витков}$$

6. Находим диаметр проводов (без изоляции):

$$d_1 = 1,13 \times \sqrt{\frac{0,54}{2,4}} = 0,535 \approx 0,53 \text{ мм.} \quad d_2 = 1,13 \times \sqrt{\frac{4,5}{2,4}} = 1,55 \approx 1,5 \text{ мм.}$$

Пример 3. Рассчитать автотрансформатор, питаемый от сети $U_1 = 127 \text{ в}$, 50 гц и работающий на нагрузки $U_2 = 220 \text{ в}$ при токе $I_2 = 2 \text{ А}$ и $U_3 = 80 \text{ в}$ при токе $I_3 = 0,5 \text{ А}$.

Схема автотрансформатора показана на рис. 6, в.

1. Определяем эдс обмоток по формуле:

$$E_1 \approx 0,95 \times 127 = 121 \text{ в} \quad E_2 \approx 1,05 \times 220 = 231 \text{ в} \quad E_3 \approx 1,05 \times 80 = 84 \text{ в}$$

2. Находим ток потребляемый из сети и токи в обмотках:

$$I_{\text{общ}} = 2 \times \frac{220}{127} + 0,5 \times \frac{80}{127} = 3,78 \text{ А} \quad I_{\text{б,в}} = 3,78 - 2 = 1,78 \text{ А}$$

$$I_{\text{в,г}} = 0,5 - 1,78 = 1,28 \text{ А (без учета знака)}$$

3. Находим габаритную мощность автотрансформатора:

$$P_{\text{Габ}} = \frac{(220 - 127) \times 2 + (127 - 80) \times 1,78 + 80 \times 1,28}{2} = 187 \text{ ВА}$$

Здесь следует обратить внимание на то, что габаритная мощность автотрансформатора в данном случае в 2,6 раза меньше, чем мощность выделяемая в нагрузках и равная $440 + 40 = 480 \text{ Вт}$.

4. По приближенной формуле находим для магнитопровода броневого типа произведение:

$$Q_c \times Q_o = 1,15 \times 187 = 215 \text{ см}^4$$

Выбираем магнитопровод типа Ш32×32, у которого $Q_c \times Q_o = 261 \text{ см}^4$. Выбранный магнитопровод имеет $Q_c = 10,2 \text{ см}^2$ и $Q_o = 25,6 \text{ см}^2$.

5. Находим числа витков обмоток по приближенной формуле:

$$w_{\text{а,б}} \approx 45 \times \frac{E_2 - E_1}{Q_c} = 45 \times \frac{231 - 121}{10,2} = 485 \text{ витков}$$

$$w_{\text{б,в}} \approx 45 \times \frac{E_2 - E_3}{Q_c} = 45 \times \frac{121 - 84}{10,2} = 163 \text{ витков}$$

$$w_{B,Г} \approx 45 \times \frac{E_3}{Q_c} = 45 \times \frac{84}{10,2} = 372 \text{ витков}$$

6. Находим диаметры проводов (без изоляции) по приближенной формуле:

$$d_{a,6} \approx 0,7 \times \sqrt{I_{a,6}} = 0,7 \times \sqrt{2} = 0,99 \approx 1,0 \text{ мм.}$$

$$d_{6,в} \approx 0,7 \times \sqrt{I_{6,в}} = 0,7 \times \sqrt{1,78} = 0,93 \text{ мм.}$$

$$d_{B,Г} \approx 0,7 \times \sqrt{I_{B,Г}} = 0,7 \times \sqrt{2} = 0,79 \approx 0,8 \text{ мм.}$$

7. Проверяем коэффициент заполнения окна:

$$k_M = 8 \times 10^{-3} \times \frac{1^2 \times 4,85 + 0,93^2 \times 163 + 0,8^2 \times 372}{25,6} = 0,27$$

Значение $k_M = 0,27 < 0,3$ указывает на то, что обмотки трансформатора разместятся в окне выбранного магнитопровода.

Пример 4. Рассчитать трансформатор, питаемый от сети $U_1 = 220 \text{ в}$, 50 гц и работающий на нагрузку $U_2 = 120 \text{ в}$ при токе $I_2 = 2,5 \text{ А}$. На первичной обмотке сделать отводы, позволяющие работать при понижении напряжения до 200 в и при повышении напряжения до 240 в .

1. Определяем эдс обмоток по формуле, отводы от обмоток:

$$E'_1 \approx 0,95 \times 200 = 190 \text{ в} \quad E''_1 \approx 0,95 \times 220 = 209 \text{ в}$$

$$E'''_1 \approx 0,95 \times 240 = 228 \text{ в} \quad E_4 \approx 1,05 \times 120 = 126 \text{ в}$$

2. Находим ток первичной обмотки:

$$I_1 = 2,5 \times \frac{126}{209} = 1,5 \text{ А}$$

3. В соответствии с формулой габаритной мощности:

$$P_{ГAB} = 120 \times 2,5 = 300 \text{ ВА}$$

4. Находим произведение $Q_c \times Q_0$. Предварительно из табл. 1 находим: $B = 1,2 \text{ Тл}$; $j = 1,8 \text{ А/мм}^2$; $\eta = 0,94$; $k_M = 0,32$. Для $P_{ГAB} = 300 \text{ ВА}$ выбираем магнитопровод стержневого типа ($s = 2$) и $k_c = 0,94$, тогда:

$$Q_c \times Q_0 = \frac{300 \times 10^2}{2,22 \times 50 \times 1,2 \times 1,8 \times 0,94 \times 2 \times 0,94 \times 0,32} = 221 \text{ мм}^4$$

Выбираем стержневой магнитопровод типа П34×50×90, имеющий $Q_c \times Q_0 = 230 \text{ см}^4$; $Q_c = 17 \text{ см}^2$; $Q_0 = b \times h = 13,5 \text{ см}^2$.

5. Находим числа витков обмоток по формулам:

$$w'_1 = \frac{190 \times 10^4}{4,44 \times 50 \times 1,2 \times 17 \times 0,94} = 450 \text{ витков}$$

$$w_1'' = 450 \times \frac{209}{190} = 495 \text{ витков} \quad w_1''' = 450 \times \frac{228}{190} = 540 \text{ витков } (270 \times 2)$$

На одной из катушек первой обмотки сделаем отводы от $450 - 270 = 180$ витков и от $495 - 270 = 225$ витков:

$$w_2 = 450 \times \frac{126}{190} = 300 \text{ витков } (150 \times 2)$$

6. Находим диаметры проводов обмоток (без изоляции):

$$d_1 = 1,13 \times \sqrt{\frac{1,5}{1,8}} = 1,03 \approx 1,04 \text{ мм.}, \quad d_1 = 1,13 \times \sqrt{\frac{2,5}{1,8}} = 1,33 \approx 1,35 \text{ мм.}$$

Пример 5. Рассчитать трансформатор, питаемый от сети $U_1 = 115$ в, 400 гц и нагруженный: на двухполупериодный выпрямитель, работающий на емкость, с выходным напряжением $U_0 = 15$ в, при токе нагрузки $I_0 = 0,3$ А; на мостовую схему выпрямителя, работающего на индуктивность, с выходным напряжением $U_0 = 35$ в при токе нагрузки $I_0 = 1,5$ А. Схема трансформатора показана на рис. 19, д.

1. Определяем напряжения и эдс обмоток:

$$E_1 \approx 0,95 \times 115 = 109 \text{ в}$$

Из табл. 2:

$$U_2 \approx 15 + \frac{1}{1,1} = 14,5 \text{ в}, \quad E_2 \approx 1,05 \times 14,5 = 15,2 \text{ в}$$

Далее из таблицы 2:

$$U_3 \approx 1,1 \times 35 + 2 = 40,5 \text{ в}, \quad E_3 \approx 1,05 \times 40,5 = 42,5 \text{ в}$$

2. Находим токи обмоток:

$$I_2 \approx 1,2 \times 0,3 = 0,36 \text{ А}, \quad I_{1,2} \approx 1,7 \times 0,3 \times \frac{15,2}{109} = 0,071 \text{ А}$$

$$I_{1,3} \approx 1,5 \times \frac{42,5}{109} = 0,585 \text{ А}, \quad I_{1\text{ОБЩ}} \approx 0,071 + 0,585 = 0,656 \text{ А}$$

3. Определяем габаритную мощность:

$$P_{\text{Габ}} = \frac{115 \times 0,656 + 14,5 \times 0,36 \times 2 + 40,5 \times 1,5}{2} = 75 \text{ ВА}$$

4. Находим произведение $Q_c \times Q_0$ для магнитопровода броневого типа; предварительно из табл. 1 находим: $B = 1,25$ Тл; $j = 4$ А/мм²; $\eta = 0,87$; $k_M = 0,3$. Полагаем $k_c = 0,92$, тогда:

$$Q_c \times Q_0 = \frac{75 \times 10^2}{2,22 \times 400 \times 1,25 \times 4 \times 0,87 \times 1 \times 0,92 \times 0,3} = 7 \text{ мм}^4$$

Выбираем магнитопровод Ш12×16, у которого $Q_c \times Q_0 = 6,9 \text{ см}^4$; $Q_c = 1,92 \text{ см}^2$; $Q_0 = 3,6 \text{ см}^2$.

5. Находим числа витков:

$$w_1 = \frac{109 \times 10^4}{4,44 \times 400 \times 1,25 \times 1,92 \times 0,92} = 278 \text{ витков}$$

$$w_2 = 278 \times \frac{15,2}{109} = 39 \text{ витков} \times 2 \quad w_3 = 278 \times \frac{42,5}{109} = 108 \text{ витков}$$

6. Определяем диаметры проводов без изоляции:

$$d_1 = 1,13 \times \sqrt{\frac{0,656}{4}} = 0,457 \approx 0,47 \text{ мм.} \quad d_2 = 1,13 \times \sqrt{\frac{0,36}{4}} = 0,34 \approx 0,33 \text{ мм.}$$

$$d_3 = 1,13 \times \sqrt{\frac{1,5}{4}} = 0,692 \approx 0,69 \text{ мм.}$$

Сопротивление обмотки рассчитывают по формуле:

$$r = 2,2 \times 10^{-4} \times l_M \times \frac{w}{d^2}$$

где l_M – средняя длина витка, см., w и d – число витков и диаметр провода (без изоляции) соответствующих обмоток.

Среднюю длину витка l_M обмоток находят для броневой и стержневой конструкций:

$$l_M \approx 2 \times (a + c) + \pi \times b$$

для кольцевых магнитопроводов:

$$l_M \approx D + 0,6 \times d + 2 \times c$$